



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL DEL TFG:** Arquitectura para el transporte de mercancías mediante UAS

**TITULACIÓ:** Grau en Enginyeria Enginyeria de Sistemes Aeroespacials

**AUTOR:** Pau Duran Garcia

**DIRECTOR:** Enric Pastor Llorens

**DATA:** 01 de juliol del 2020

**Títol:** Arquitectura pel transport de mercaderies mitjançant UAS

**Autor:** Pau Duran Garcia

**Director:** Enric Pastor Llorens

**Data:** 01 de juliol del 2020

## Resum

Aquest document planteja i desenvolupa de forma teòrica una arquitectura pel transport de mercaderies mitjançant UAS. De la mateixa manera, identifica quines son les principals dificultats organitzatives i tecnològiques actuals per dur-la a terme, proposa possibles solucions i determina quins aspectes mereixen especial atenció per part de les autoritats competents i dels futurs investigadors.

L'arquitectura que aquí es presenta ha estat especialment dissenyada per respondre a les necessitats dels potencials usuaris finals, els quals han sigut identificats com empreses b2c que precisen de una *last-mile delivery* en zones urbanes i empreses b2b amb un model JIT d'emmagatzematge. Aquest projecte també considera la legislació vigent i futura per tal de detectar modificacions necessàries i ajustar l'arquitectura a la legalitat. En aquest àmbit es proposa i detalla solucions per les autoritats competents basades en STS per sectors i en validacions automàtiques de plans de vols.

Així mateix, aquest document examina les característiques que precisa un UAV per realitzar les entregues de les mercaderies. Concretament estudia les implicacions de les diferents fonts d'alimentació empleables, presenta els protocols i sistemes necessaris pel control de les operacions i determina les estructures més òptimes dels vehicles segons el seu servei i missió. Per altra banda, també es proposen diferents estructures del VLL en funció de l'espai on es vulgui implementar l'arquitectura. Aquestes organitzacions estan dissenyades per oferir la millor solució possible des del punt de vista de l'eficiència, la capacitat i la seguretat.

Finalment, aquest projecte planteja l'ús de diversos algorismes i procediments tàctics i pre-tàctics per incrementar l'eficiència i la seguretat, així com per reduir els costos, la petjada mediambiental i els possibles temps d'espera del conjunt de tota l'arquitectura.

Degut a l'alt contingut teòric d'aquest document, resulta poc pràctic i precís resumir les diferents conclusions dins d'aquest resum. Per això, s'inclou el Capítol 5: un apartat específicament dedicat a exposar de forma clara i concisa les conclusions més importants que s'extreuen d'aquest estudi.

**Título:** Arquitectura para el transporte de mercaderías mediante UAS

**Autor:** Pau Duran Garcia

**Director:** Enric Pastor Llorens

**Fecha:** 01 de julio de 2020

## Resumen

Este documento propone y desarrolla de forma teórica una arquitectura para el transporte de mercancías mediante UAS. Asimismo, identifica cuales son las principales dificultades organizativas y tecnológicas para llevarla a cabo, propone posibles soluciones y determina qué aspectos merecen especial atención por parte de las autoridades competentes y de los futuros investigadores.

La arquitectura que aquí se presenta ha estado especialmente diseñada para responder a las necesidades de los posibles usuarios finales, los cuales han sido identificados como empresas b2c que precisan de una *last-mile delivery* en zonas urbanas y empresas b2b con un modelo JIT de almacenamiento. Este proyecto también considera la legislación vigente y futura para detectar modificaciones necesarias y para ajustar la arquitectura a la legalidad. En este campo se proponen y detallan soluciones para las autoridades competentes basadas en STS por sectores y en validaciones automáticas de planes de vuelo.

De la misma forma, este documento examina las características que precisa un UAV para realizar las entregas de las mercancías. Concretamente estudia las implicaciones de las distintas fuentes de alimentación empleables, presenta los protocolos y sistemas necesarios para el control de las operaciones y determina las estructuras más óptimas de los vehículos según su servicio y función. Por otra parte, también se proponen diferentes estructuras del VLL en función del espacio donde se desee implementar la arquitectura. Estas organizaciones están diseñadas para ofrecer la mejor solución posible desde el punto de vista de la eficiencia, la capacidad y la seguridad.

Finalmente, este proyecto plantea el uso de distintos algoritmos y procedimientos tácticos y pre-tácticos para incrementar la eficiencia y la seguridad, así como para reducir los costes, la contaminación y los posibles tiempos de espera del conjunto de toda la arquitectura.

Debido al alto contenido teórico de este documento, resulta poco práctico y preciso resumir las distintas conclusiones en este resumen. Por eso, se añade el Capítulo 5: un apartado específicamente dedicado a exponer de forma clara y concisa las conclusiones más importantes que se pueden extraer de este estudio.

**Title:** UAS Network for goods delivery applications

**Author:** Pau Duran Garcia

**Director:** Enric Pastor Llorens

**Date:** July 01st 2020

## Overview

This document proposes and theoretically develops an UAS network for goods delivery applications. Likewise, it identifies its main organizational and technology difficulties, suggests possible solutions and determine the aspects that deserve particular attention from the competent authorities and the future researchers.

The network presented has been specially designed to respond the needs of potential users which have been identified as companies b2c with a last-mile delivery in urban areas and companies b2b with a JIT storage strategy. This project also contemplates the current and future legislation to find necessary modifications and setting the network to legality. In this field solutions have been proposed based on sectorized STS and automatic flight plan validations.

Moreover, this document reviews the required UAV's characteristics to perform a goods delivery operation. Specifically, it assess the different implications of the employable power sources, presents the necessary protocols and control systems, and establish the optimum vehicle's frame according to each service and task. Besides, different VLL structures have also been proposed depending on the region where the network implementation intends to take place. These structures have been designed to provide the best solutions in terms of efficiency, capacity and safety.

Lastly, this project presents algorithms and tactic and pre-tactic procedures to increase the efficiency and the safety, as well as to decrease the costs, the environmental footprint and the potential waiting times of the whole network.

Due to the high theoretical content of this document, it lacks practicality to sum up all the distinct conclusions in this overview. Therefore, Chapter 5 has been added: a section exclusively created to lay out clearly and concisely the most important conclusions of this study.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. APLICACIONES, VENTAJAS Y BENEFACTORES.....</b>	<b>3</b>
1.1. BUSINESS TO BUSINESS Y ENVÍOS PROPIOS DE UNA EMPRESA.....	5
1.2. BUSINESS TO CLIENT.....	8
1.3. SERVICIOS PÚBLICOS.....	11
<b>CAPÍTULO 2. VIABILIDAD LEGAL.....</b>	<b>14</b>
2.1. CATEGORÍAS OPERACIONALES.....	15
2.2. CATEGORÍAS DE UAVs.....	18
2.3. DIFICULTADES LEGALES Y POSIBLES SOLUCIONES.....	20
<b>CAPÍTULO 3. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS.....</b>	<b>25</b>
3.1. ESTRUCTURA.....	25
3.2. FUENTES DE ALIMENTACIÓN.....	33
<b>CAPÍTULO 4. ARQUITECTURA.....</b>	<b>44</b>
4.1. CONTROL OPERACIONAL.....	44
4.2. ESTRUCTURA DE LA RED DE RUTAS.....	51
4.2.1. Business to business y envíos propios de una empresa.....	51
4.2.2. Business to client.....	55
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>64</b>
ANEXO 1.....	64
ANEXO 2.....	65
ANEXO 3.....	66
3.1. Conexiones no lineales entre waypoints.....	66
3.2. Planificación pre-táctica y táctica para conflictos potenciales.....	67
ANEXO 4.....	69
4.1. Algoritmos de optimización de redes multipath.....	69
4.2. Fases para la implementación del transporte mediante UAS en zonas urbanas.....	71
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años el uso comercial de vehículos autónomos no tripulados (UAVs) en el espacio aéreo inferior (VLL) ha suscitado un gran interés en el mundo aeronáutico. Esto es debido a las numerosas aplicaciones que podría tener su implementación en un futuro así como sus beneficiosas características. Uno de los sectores que más podría favorecerse por la implementación de estos vehículos, y en el cual se va a centrar este proyecto, es el del transporte y entrega de mercancías. Se prevé que los sistemas de UAVs, también llamados UAS, puedan facilitar entregas de una forma más rápida, barata y ecológica que el transporte convencional terrestre [1-2]. Es por eso que se estima que el sector del transporte de mercancías mediante UAS pase de valer 2,1 billones de USD en 2023 a 27,4 billones de USD en 2030 [3]. Los motivos por los cuales este modelo de negocio no es ya una realidad a pesar de tener unas ventajas tan atractivas y una proyección económica tan favorable, son: la legislación vigente, la falta de infraestructuras y de protocolos operativos estandarizados, la manca de acuerdos oficiales entre entidades competentes y la insuficiente fiabilidad de algunos sistemas necesarios para el correcto funcionamiento del UAV, y en consecuencia, de toda la arquitectura requerida para satisfacer las necesidades del transporte de mercancías mediante UAS.

A día de hoy, muchos avances significativos ya se están llevando a cabo en este campo para garantizar una arquitectura eficiente y segura. Los más destacados son el proyecto UTM RTT – JMP [4], organizado por la NASA y la FAA, y el U-Space [5], organizado por la Comisión Europea, la EASA, SESAR y Eurocontrol. Sin embargo, y aun teniendo en cuenta la magnitud e importancia de estos estudios, el resultado final y funcionamiento práctico del transporte aéreo mediante UAS está aún poco definido. Es por eso que en este proyecto se desarrolla y presenta un posible modelo de gestión aeronáutica para dicho cometido.

Para ello, se desarrolla en las siguientes páginas un estudio para determinar cómo, a quién y para qué puede resultar útil esta clase de transporte de mercancías y qué vehículos son los más indicados para realizar estas operaciones teniendo en cuenta sus prestaciones y limitaciones. Al mismo tiempo, se proponen posibles modificaciones en la legalidad actual para contemplar las necesidades de este nuevo servicio. Finalmente, teniendo en cuenta los estudios y sugerencias mencionadas, este trabajo presenta una posible organización del VLL de la arquitectura y define qué protocolos, funciones e instalaciones se precisan para su buen funcionamiento.

El primer objetivo de este proyecto, tal y como se acaba de mencionar, es diseñar a nivel teórico como deberá ser la arquitectura final de un modelo práctico de transporte de mercancías mediante UAS teniendo en cuenta su eficiencia, seguridad, coste, escalabilidad y contaminación.

Derivado de este primero, el segundo objetivo del proyecto consiste en detectar qué dificultades organizativas y tecnológicas conlleva la implementación de la arquitectura diseñada, plantear posibles soluciones e identificar cuáles de ellas son realmente necesarias para la optimización y seguridad del transporte de mercancías mediante UAS y cuáles no. De esta forma, se pretende ayudar a focalizar de una mejor manera los esfuerzos y recursos en la investigación, recerca y creación de aquello que será verdaderamente importante en el día de mañana. Ya que, una vez se sabe con certeza dónde se quiere llegar, es más fácil trabajar para conseguirlo.

Si es verdad que a lo largo de este escrito se irán definiendo y empleando distintos acrónimos, a continuación se muestra un resumen de aquellos utilizados en este apartado y que resultan básicos para la comprensión del resto del proyecto:

UAV = Vehículo No Tripulado

VLL = Nivel de vuelo inferior (hasta 500 ft AGL)

UAS = Sistema de Vehículos No Tripulados

UTM = Gestión del Tráfico UAS

RTT = Equipo de Investigación para la Transición

JMP = Plan Común de Organización

NASA = Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (USA)

FAA = Administración Federal de Aviación (USA)

U-SPACE = Servicios para brindar seguridad y eficiencia a los UAVs en el espacio aéreo.

EASA = Agencia Europea de Seguridad Aérea

SESAR = Sistema Europeo Único Para la Gestión del Tráfico Aéreo

EUROCONTROL = Organización Europea Para la Seguridad de la Navegación Aérea.

## CAPÍTULO 1. APLICACIONES, VENTAJAS Y BENEFACTORES

A la hora de plantear cualquier proyecto es importante saber para quién y con qué finalidad se diseña.

Tal y como se ha mencionado en el apartado la introducción, este estudio en concreto tiene dos finalidades: la primera, diseñar como debe ser la arquitectura que de un servicio práctico de transportes de mercancías mediante UAS y la segunda, detectar en qué nuevas tecnologías y competencias se debería poner el foco de atención. Por este motivo, es lógico que este proyecto también vaya destinado a dos tipos de colectivos. Uno incluye todos aquellos interesados en hacer uso de la arquitectura diseñada y el otro incluye aquellos interesados en proporcionar las herramientas necesarias para que dicho uso sea el adecuado.

El colectivo interesado en proporcionar las herramientas necesarias para el uso adecuado de la arquitectura diseñada está formado por fabricantes de UAVs (*manufacturers*), entidades legales o organizaciones destinadas a la seguridad aérea y por proveedores de sistemas para la navegación aérea no tripulada. La aplicación que tiene este proyecto para los *manufacturers* y los proveedores de sistemas es la de saber qué características debe de tener su producto para ser comercializado para el uso de la arquitectura diseñada. Por su parte, la aplicación para las entidades legales es la de saber qué funciones deberá llevar a cabo y, en consecuencia, que leyes y organizaciones deben de crearse o utilizarse para que estas funciones se realicen de forma correcta.

El otro colectivo al que va dirigido este proyecto es el interesado en hacer uso de la arquitectura diseñada, ya que sus necesidades son la razón de la creación de un sistema de transporte de mercancías mediante UAS. En este estudio la arquitectura diseñada está focalizada concretamente para dar solución a la distribución comercial. Es decir, será una arquitectura pensada para todas aquellas transacciones que involucren una empresa, ya sea con envíos entre la misma empresa, entre dos empresas distintas (b2b) o entre una empresa y un particular (b2c). Es importante identificar qué empresas y qué tipo de negocios se beneficiarían de ésta implementación ya que sus características definirán en gran parte la estructura y el uso de la arquitectura presentada en este trabajo y sus necesidades deben ser cubiertas por el servicio que ésta pueda prestar.

Aún que el sistema de transporte que se presenta a lo largo del trabajo está centrado en el uso empresarial, el espacio aéreo es un recurso limitado y compartido. Por lo tanto, si se quiere crear un sistema funcional y escalable, no tiene sentido plantearlo sin tener en cuenta los posibles conflictos que pueden suceder con los sistemas que se utilicen para satisfacer las necesidades que tenga la sociedad en el futuro.



Por este motivo, para el diseño de la arquitectura que se pretende, este proyecto también considera aplicaciones UAS más allá del sector del transporte. Estas aplicaciones serán valoradas en el apartado de 1.3. Servicios Públicos. Por contrapartida, se ha decidido obviar aquellos servicios relacionadas con la agricultura [9] y con el control forestal [10]. Aunque últimamente muchos avances se han realizado en estos sectores, su alejada ubicación respecto del resto de operaciones y el hecho que en ningún caso su aplicación es transportar mercancías entre dos puntos, les hace irrelevantes para la arquitectura que se quiere desarrollar.

Antes de presentar las aplicaciones específicas para cada tipo de envío del colectivo interesado en hacer uso de la arquitectura diseñada, es importante mencionar una ventaja comuna de todos ellos: la mejora medioambiental. Como se puede apreciar en la *Figura 1*, la energía consumida por las operaciones realizadas mediante UAV es considerablemente menor a los otros modelos existentes. Sin embargo los UAV tienen un ratio menor de entregas por operación, y por eso los datos verdaderamente interesantes son los que reflejan la *Figura 2*, donde se muestra la emisión total de gases de efecto invernadero por cada entrega en USA y diferenciados por el tipo de vehículo utilizado.

Como el ahorro medioambiental depende de muchas variables, como las rutas finales que utilicen los UAV para realizar las entregas o como genera cada país la energía que usarán los vehículos, el porcentaje de mejora gracias a la implementación de un sistema de transporte mediante UAS es aún ambiguo y varía según las fuentes consultadas. Aún así, todos los estudios concluyen que si se usa el vehículo adecuado se puede mejorar la alternativa más sostenible utilizada actualmente: la entrega de mercaderías mediante furgonetas eléctricas [11-12]. Si se tiene en cuenta que el sector del transporte genera el 25% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el mundo [6], cualquier mejora que reduzca la contaminación de dicho sector significa un avance significativo.

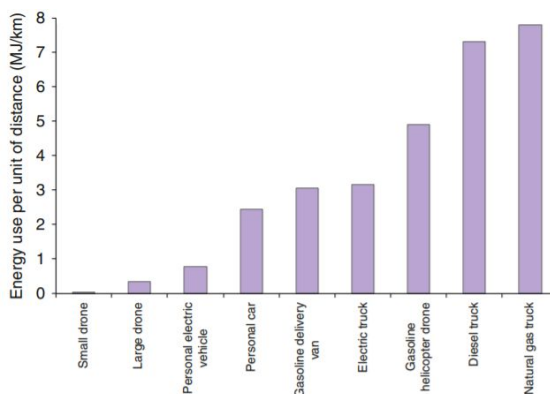


Figura 1: Energía consumida/Km según tipo de vehículo.

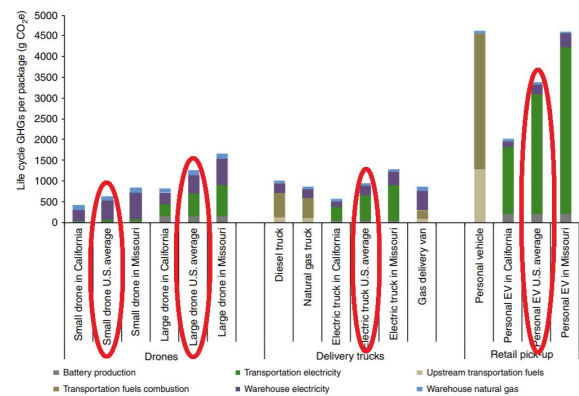


Figura 2: Emisión de gases invernaderos/entrega según tipo de vehículo.

Fuente: Artículo *Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery* [11].

## 1.1. BUSINESS TO BUSINESS Y ENVÍOS PROPIOS DE UNA EMPRESA

Toda empresa, sea cual sea el servicio o producto que comercialice, necesita los beneficios que le ofrece otra empresa para realizar su cometido final. Esto es debido a que no es sostenible ni eficaz gestionar todas las necesidades propias que tiene una compañía. El modelo de negocio que relaciona el servicio de una empresa con las necesidades de otra es conocido como b2b. Aunque el mercado evolucione o varíe estas necesidades seguirán existiendo y por lo tanto, es de suponer, que los negocios destinados a empresas seguirán también presentes en un futuro. Por lo tanto, si quiere diseñar una arquitectura para el transporte de mercancías mediante UAS destinada al uso comercial, el b2b es un importante modelo a tener en cuenta.

Las b2b se suelen clasificar normalmente entre empresas industriales y empresas de servicio. Sin embargo, esta definición es demasiado general para el desarrollo de este proyecto así que se ha decidido diferenciarlas de forma más concreta y según su cometido. Esta subclasificación más específica distingue entre empresas de bienes entrantes, destinadas a producir componentes y materiales para la fabricación de los productos de otras compañías, empresas de bienes intermedios, destinadas a generar productos que otras compañías usarán para generar los suyos propios, y empresas de servicio, destinadas a asistir a otras compañías para crearles un beneficio esté o no relacionado directamente con su producto. Las relaciones que más se frecuentan entre este tipo de empresas son las de relacionadas con un fabricante (proveedor-fabricante, fabricante-mayorista y fabricante-minorista), las relacionadas con un mayorista (fabricante-mayorista y mayorista-minorista), las relacionadas con un minorista (fabricante-minorista y mayorista-minorista) y las relacionadas con una empresa de servicio (servicio contratado-contratante).

La concatenación de las relaciones b2b que se acaban de presentar, juntamente con la relación final del modelo b2c que une mayoristas y minoristas con clientes, es conocida como cadena de suministro. Ya que el b2b está involucrado en todas estas relaciones a excepción de la última, se puede afirmar que este modelo de negocio representa casi la totalidad de la cadena de suministro, y por lo tanto, que las desventajas de dicha cadena serán también las de los negocios b2b.

Un elemento clave en la cadena de suministros es el uso de los almacenes, ya que son el nexo de unión de la mercancía que se proporciona de una empresa a la otra, ya sea materiales, piezas de producción o productos listos para la venta y consumo. Para las compañías, los almacenes represan entre un 2% y un 5% de los costes de venta [17], sin embargo a la práctica acaban generando un importante nivel de pérdidas difíciles de cuantificar y que se incluyen dentro de los *hidden costs*.

Disponer de almacenes pequeños respecto al volumen de necesidad de la empresa provoca la disminución del tamaño de los pedidos y en consecuencia el encarecimiento de estos. Por otra parte se corre el riesgo que cualquier contratiempo suponga quedarse sin los productos que se precisan y por lo tanto, que se detenga la cadena de suministro reduciendo notablemente la productividad. Por contrapartida, los almacenes de mayor tamaño que garantizan siempre el abastecimiento de aquello que se necesita aumentan los costes fijos: precio más elevado del alquiler, más trabajadores contratados, más recursos para la organización del almacén y más costes de mantenimiento. Además, como se dispone de un espacio que se necesita amortizar, el volumen de los pedidos y de los productos almacenados se acrecienta, cosa que provoca que también lo hagan las discrepancias entre el estado actual de las mercancías y los inventarios, las mercancías que se dañan o pierden y los productos que quedan obsoletos. En el año 2018 se calculó que aproximadamente el 10% de los productos de las empresas distribuidoras que contaban ya con softwares de optimización se quedaron obsoletos [18]. Los grandes almacenes también aumentan los costes intangibles como el tiempo, ya que precisan de una mayor control del *stock* y en ellos se tarda más en identificar y recoger los productos.

Las b2b se han especializado durante los años para solventar esta problemática. Por un lado las empresas que por su tipo de negocio requieren grandes cantidades de stock y materiales han optado por asumir los gastos fijos de los grandes espacios y reducir todos los otros mediante la industrialización de los almacenes. Por el otro, las empresas interesadas en disminuir el tamaño de sus almacenes han decidido adoptar la estrategia *Just In Time* (JIT). Esta estrategia consiste en pedir solamente los productos para los cuales ya se ha hecho una comanda previa con el fin de aumentar los beneficios a base de reducir los costes de los grandes almacenes y de adaptar los encargos a la fluctuante demanda actual. La JIT sin embargo conlleva una serie de riesgos y es que deja poco margen para el error. Solamente que una de las empresas se retrase o equivoque en el pedido es suficiente para que haya pérdidas en la línea productiva y toda la cadena de suministro se pare por completo. Como es de suponer el tiempo es un factor clave para esta estrategia y es por eso que muchas empresas que trabajan conjuntamente mediante esta metodología tienen instalaciones en espacios muy cercanos.

Actualmente se han desarrollado diferentes aplicaciones que los UAVs pueden llevar a cabo para mejorar la eficiencia de los dos tipos de almacenaje que usan los b2b. Una de las más destacables, y que a día de hoy ya se ha implementado en distintas instalaciones, es la detección y organización del *stock* en grandes almacenes mediante la tecnología *RFly*. Gracias a las señales emitidas por pegatinas *batteryless* los vehículos pueden detectar de forma rápida y fiable donde se encuentra un producto concreto dentro de un almacén ahorrando hasta billones de euros en las posibles discrepancias que surgen entre los inventarios y las posiciones reales de los productos [15-16]. Sin embargo, en ningún momento de este proceso, el UAV transporta mercancías entre dos puntos y por lo tanto consideraremos esta aplicación irrelevante para la arquitectura que este proyecto desea presentar.

Por otro lado, las empresas que siguen la estrategia JIT han empezado a plantear los UAVs como alternativa de transporte viable para sus pedidos, ya que en algunos casos, estos podrían llegar a reducir hasta un 80% el tiempo de suministro, disminuir hasta un tonelada al año las emisiones de gases contaminantes derivados del transporte y permitir realizar pedidos más específicos y flexibles [19]. A parte los UAS podrían también ser utilizados como sistema de apoyo al transporte por carretera habitual. Si alguna comanda se ha realizado de forma errónea o contiene algún producto defectuoso que cree retrasos en la línea productiva éste puede ser enmendado de forma rápida enviando los productos correctos vía UAV. A diferencia de las aplicaciones para empresas que usan grandes almacenes, éstas si resultan de interés para los objetivos que pretende este proyecto y se deben tener en cuenta para realizar una arquitectura de transporte mediante UAS destinado al uso empresarial.

Otra aplicación que tendría la arquitectura presentada para una gestión más efectiva de los almacenes es la de transportar productos entre instalaciones propias de una misma empresa para así reorganizar las mercancías en función de las necesidades actuales que se deban satisfacer. Por ejemplo, si una empresa dispone de dos almacenes y uno de ellos está abasteciendo una demanda inusualmente alta de un producto mientras que el otro tiene excedente de éste mismo, la empresa en cuestión puede realizar un envío propio mediante UAVs y reajustar el volumen de *stock* para así adaptar el inventario a las necesidades reales de cada momento. Esta misma aplicación sirve también para comercios b2c con más de un establecimiento físico. Si un cliente solicita un producto que no está disponible en uno de los establecimientos pero sí lo está en otro, en lugar de intentar que el cliente se desplace y generar el riesgo de perder una venta, es mejor desplazar el producto a cambio de un tiempo de espera aceptable y, si es necesario, un extra sobre el precio final. Si es verdad que este tipo de servicio también se puede dar con los vehículos convencionales terrestres los tiempos de entrega que éstos ofrecen y la necesidad que tienen de llevar a la vez muchos productos para que sus desplazamientos sean rentables hace de dichos vehículos una opción cara e ineficiente en comparación de las prestaciones que ofrecen los UAVs para esta aplicación concreta. Aunque este servicio sirve tanto para empresas b2b como b2c, se ha decidido incluirla dentro las b2b ya que las características del uso de la arquitectura diseñada que harían los vehículos es más parecido a las del b2b que a las del b2c.

Teniendo en cuenta todo lo presentado anteriormente y las aplicaciones que podría tener un sistema de mercancías mediante UAS, se han identificado las empresas b2b que más podrían beneficiarse de la implementación de los UAVs. Estas empresas son las de bienes entrantes y las de bienes intermedios, más concretamente aquellas que sigan la estrategia JIT. Aunque existen relaciones de mayoristas y minoristas que también la usan, la gran mayoría de empresas con una estrategia JIT son las involucran a un fabricante y por lo tanto, las relacionadas directamente a la industria.

Para ser más específicos el mayor número de empresas industriales con estrategia JIT son las del sector de la moda y calzado, sector automovilístico, sector de productos de lujo, sector tecnológico, sector aeronáutico y el sector de la maquinaria industrial [20-21].

Con el objetivo de crear un sistema de transporte de mercancías lo más eficiente posible, es importante conocer qué características de las b2b que se acaban de identificar como beneficiarios van a influir en la arquitectura que se desea presentar. La principal singularidad de este modelo de negocio es la duradera longevidad contractual de las relaciones entre las empresas implicadas. Esta estabilidad que genera los contratos entre las empresas acota la arquitectura a diseñar en espacio, ya que los puntos de origen y destino serán habitualmente los mismos y por lo tanto, las rutas óptimas entre ellos también. Así mismo, la tarea que llevarían a cabo los UAVs para estas b2b es tan específica que es de suponer que dichos puntos serán reducidos en número y que las entregas a realizar mayoritariamente serán repetitivas.

Que las entregas sean repetitivas implica que cada operación se efectuará habitualmente en intervalos de horarios concretos y con cargas de un intervalo de peso concreto. Aún así, se debe tener en cuenta que a las b2b les interesa que los vehículos puedan transportar cuanto más peso mejor, ya que eso añade flexibilidad en los pedidos que pueden hacer. Por último, es importante mencionar que las b2b que trabajan juntas utilizando la estrategia JIT se encuentran normalmente en una área geográfica cercana y en polígonos alejados de las zonas urbanas. Nótese también que nunca se afirma que los datos van a ser constantes durante el periodo contractual de las empresas, ya que se cuenta que un porcentaje de las operaciones van a ser aleatorias debido a emergencias y que las características de los pedidos fijos puede variar según la demanda del fabricante.

## **1.2. BUSINESS TO CLIENT**

Gracias a la expansión de las transacciones comerciales a través de internet (*e-commerce*) el b2c se ha convertido en una de las estrategias de venta que más ha aumentado en los últimos años. Se estima que en el 2023 solamente en USA se facturen más de 735 billones de USD en ventas mediante el *e-commerce*, suponiendo un incremento del 45% respecto el año 2018 [12]. Este aumento es de gran importancia para el proyecto que se presenta a continuación ya que un porcentaje importante de estas ventas van asociadas a un envío b2c. El crecimiento del *e-commerce* es debido al continuo uso de internet, la popularización de los smartphones, la posibilidad de conectar vendedores y consumidores de todo el mundo y la comodidad que tienen los clientes en poder comprar desde cualquier sitio y, de forma rápida y eficiente, recibir su pedido al lugar donde ellos más les convenga.

La aplicación de la implementación de un sistema de transporte de mercancías mediante UAS para el b2c supondría una mejora en la eficiencia de la *last-mile delivery*; como se conoce popularmente la fase de entrega de una mercancía desde el último hub de distribución al cliente. Actualmente, para las grandes distribuidoras de productos de venta online esta fase es la más ineficiente y cara de todas, siendo responsable de la mayoría de retrasos en la entrega y de un mínimo del 28% de los gastos totales del envío [6]. Para los pequeños y medianos comercios que también optan por dar un servicio b2c los valores de la *last-mile delivery* aumentan negativamente tanto en retraso como en gastos de envío. Por este motivo el uso de los UAVs puede ser tan beneficioso, ya que con su implementación proporcionaría una solución doble. Por un lado, reduciría el coste total de envío y por la otra el tiempo de servicio. Además, se calcula que alrededor del 30% de los clientes estarían dispuestos a pagar un extra por un servicio más rápido y fiable [8]. Teniendo en cuenta que la mayor demanda de entregas b2c se encuentra en las áreas urbanas y que se calcula que el 66% de la población en 2050 vivirá en ellas [7], los valores absolutos de mejora de los servicios prestados por UAS serán cada vez mayores a medida que avancen los años.

Otra mejora que supondría el uso de los UAVs para el b2c es el aumento del rango de servicio de las empresas que elijan implementarlos en sus entregas. Para reducir los problemas del *last-mile delivery*, se han desarrollado cuatro tipos de soluciones: dos de ellas para grandes empresas y otras dos para empresas más modestas. La primera consiste básicamente en tener un gran volumen de ventas; aunque el margen de beneficio de cada entrega sea pequeño. De esta forma, si se hace el suficiente número de entregas al final el negocio es rentable. La segunda solución consiste en dividir la área que se quiere abastecer por sectores y colocar un centro de distribución en cada uno de ellos, de esta forma cada centro se responsabiliza sólo de las entregas de su sector. La tercera solución es delimitar la área de entrega y dar servicio exclusivamente a los clientes que se encuentren a una distancia determinada del centro de distribución. La cuarta, y última solución, consiste en delegar el envío del producto en una empresa ya existente de mensajería.

Obviamente, respecto a la primera y última soluciones presentadas la entrega mediante UAS no supondría ninguna mejora en relación al rango de acción. Sin embargo, sí lo supondría respecto a las dos restantes ya que con la arquitectura que se desarrolla en este estudio y el consumo inferior que tienen los UAV por entrega respecto a los vehículos que se usan actualmente [14], se puede aumentar el rango de servicio sin ningún coste adicional.

Por todo lo que se ha expuesto, es importante identificar las empresas b2c que más podrían beneficiarse de la implementación que presenta este proyecto. Dichas empresas son y serán aquellas que pretendan distribuir mediante la venta online un producto físico directamente al cliente sin que éste tenga que pasar a recogerlo a un punto de distribución.

Algunos ejemplos de empresas que al 2019 ya están facturando más del 30% de sus ventas mediante este modelo son las del sector de la moda, belleza, tecnología, alimentación (supermercados y restaurantes), electrodomésticos, hogar, jardinería, salud y farmacia [13].

Asimismo, otras grandes favorecidas por un sistema de transporte de mercancías mediante UAVs son las empresas que ofrecen todos o una mayoría de productos de los sectores mencionados a la vez. Éstas son los grandes almacenes físicos y los *marketplace*, plataformas online que gracias a su popularidad ponen en contacto vendedores con clientes y, ya sea de forma propia o con acuerdos con empresas de mensajería, distribuyen los productos donde el cliente lo requiera.

Las empresas de mensajería mencionadas anteriormente son las últimas identificadas como beneficiarias directas de la implementación de los UAVs en el VLL. Si es verdad que según quién contrate sus servicios se pueden definir tanto como b2b como b2c, en este estudio se ha decidido catalogarlas como b2c ya que el tipo de uso que haría de la arquitectura presentada se ajusta más a esta clase de negocio. Las ventajas que tendrían las empresas de mensajería serían solamente las presentadas en relación a la *last-mile delivery*, ya que a día de hoy, éstas ya tienen alcance a todos los lugares que precisen.

Para poder realizar un mejor planteamiento de cómo debería de ser la arquitectura práctica que pretende este trabajo es relevante determinar qué características de las b2c influyen a dicha arquitectura. Su principal, es el hecho que desde cualquier punto de origen (donde se encuentre el producto) deben de poder conectarse a cualquier punto de destino (donde se encuentre el cliente). Es por eso que hay muchos puntos distintos de origen y aún más de destino, cosa que implica tener una arquitectura geográficamente más extendida. Además, a diferencia del b2b, este modelo de negocio está basado en relaciones cortas. Por ello, ni los puntos de destino serán visitados de forma regular ni la mercancía a transportar será constante, creando consecuentemente, una mayor aleatoriedad tanto en las rutas a seguir como en el peso con el que se viaje por ellas. Otra característica notable es la fluctuación a nivel de trabajo, aunque se trate de un mercado más o menos constante es conocido que hay picos de demanda en determinadas épocas del año (rebajas, *black friday*, navidades, San Valentín, día del padre o de la madre...). Por lo tanto, la arquitectura de nuestro sistema tendrá que estar diseñada para soportar una mayor carga de operaciones de las que habitualmente realice. Finalmente, también se tiene que tener en cuenta que las b2c están interesadas en un rango de alcance cuanto mayor mejor, ya que ésto significa aumentar el número de clientes potenciales.

Para terminar, es importante mencionar que a pesar de sus ventajas, este proyecto contempla las entregas con destino a zonas rurales únicamente a nivel teórico y desarrolla solamente a nivel práctico la arquitectura de las operaciones b2c de zonas urbanas. De esta forma se pretende acotar el tipo de conflictos a resolver y focalizar la área de interés del estudio donde, a día de hoy, hay más dificultades y posibles usuarios.

### 1.3. SERVICIOS PÚBLICOS

El transporte de mercancías mediante UAS no es la única aplicación que se prevé para los UAVs en un futuro. De hecho, algunas de estas otras aplicaciones se encuentran ya en fases más adelantadas y se espera que se implementen antes que la que presenta este proyecto. Como el VLL es un recurso limitado y compartido, si se quiere diseñar una arquitectura funcional para el transporte de mercancías, se debe tener en cuenta todos los UAS que vayan a coexistir en el mismo espacio aéreo. A continuación se van a presentar las aplicaciones de UAVs para los servicios públicos y se van a diferenciar entre prioritarios y no prioritarios. El objetivo de este apartado no es identificar los sectores implicados y las ventajas que representan los UAS para ellos, sino es estudiar los efectos que supondría su implementación para la arquitectura que se desea presentar. De esta forma se pretende desarrollar un sistema de transporte más eficaz, escalable y preparado para evitar posibles conflictos en un futuro.

Uno de los servicios públicos prioritarios es el relacionado con el sector policial. Muchas fuerzas y cuerpos de seguridad ya están desarrollando lo que se llamará “departamento de drones”, unidades especiales destinadas al uso de los UAVs [23]. La mayoría de las aplicaciones que ofrecen estos vehículos para este tipo de servicio están altamente asociadas con los mapas ortomosaicos [22], como la cartografía en tiempo real de lugares altamente poblados y susceptibles de tener que sufrir una evacuación o intervención táctica, la documentación de escenas exteriores de crímenes y accidentes o el estudio de zonas afectadas por infraestructuras dañadas. Sin embargo, también existen aplicaciones para los UAVs fuera de este ámbito, por ejemplo, la persecución de delincuentes dados a la fuga, la identificación de sospechosos o la intervención de otros UAVs haciendo un uso ilegal del espacio aéreo. Como se puede apreciar estas aplicaciones necesitan sobrevolar tanto una área concreta como una gran extensión de terreno, además deben de poder dar servicio a cualquier lugar que se precise y, por eso, necesitan tener un rango de acción geográficamente grande. También es notable que la mayoría de dichas aplicaciones están relacionadas con lo que sucede a nivel de suelo y por eso, sus operaciones deberían ocupar el nivel inferior del VLL. Finalmente, se debe tener en cuenta que estos servicios requieren un alto nivel de flexibilidad cosa que añade aleatoriedad en el tiempo de vuelo, en las áreas y rutas usadas y en el peso de los instrumentos con los que los UAVs están equipados.

Otro servicio prioritario de los UAS que puede afectar a la arquitectura que se desea plantear es la asistencia durante la extinción de incendios. En este sentido los UAVs pueden tener aplicaciones como el monitoreo de la área afectada, la detección del foco del incendio y la capacidad de dejar bolas extintoras en puntos peligrosos y de difícil acceso para los humanos [25]. En Estados Unidos 69 departamentos de bomberos adquirieron UAVs para este cometido entre el 2009 y el 2017 [24].



Si es verdad que esta aplicación tiene sus mayores virtudes en áreas forestales y alejadas de otras posibles operaciones, también puede ser aplicada en zonas urbanas. Las intervenciones de los UAVs en este servicio acostumbran a ser de larga duración, sobre una área concreta y, habitualmente, en un nivel de vuelo de 200 ft AGL [26]. Al igual que sucede con las aplicaciones policiales, este servicio debe poder prestarse en cualquier punto que se precise, por lo que la arquitectura que se desea desarrollar debe poder adaptarse en todos los puntos para no interferir las características que se acaban de presentar.

Los UAS también ofrecen aplicaciones prioritarias para los servicios médicos. La posibilidad de transportar material y equipamiento necesario a cualquier lugar donde haya sucedido una emergencia [30] o hacer entregas de órganos y de muestras de laboratorio en poco tiempo [27] son algunos ejemplos de ello. A diferencia de los servicios públicos presentados hasta ahora, éste es más acotado ya que las instalaciones médicas como los hospitales actúan siempre como punto de origen o como punto de destino.

Que haya puntos reiterados indica que hay rutas que serán operadas con frecuencia y que dichos puntos pueden ser susceptibles a tener conflictos. Sin embargo, al tener aplicaciones directamente relacionadas con emergencias este servicio también debe disponer de cierta flexibilidad y de un rango de acción geográficamente extendido.

En contraposición de los servicios expuestos hasta ahora existen los servicios públicos no prioritarios. Estos servicios suelen ser rutinarios o planificados con antelación, hecho que nos permite programarlos a conveniencia. Además, llevan a cabo una única función previamente definida por lo que las áreas y rutas operadas son conocidas, así como el peso y el tiempo que van a emplear. Dichos servicios suelen necesitar sobrevolar una zona concreta con que su extensión geográfica es limitada. La rapidez con la que se ejecuta sus aplicaciones no es un factor clave y su objetivo no está relacionado con dar una mejor respuesta delante de posibles emergencias. Por eso, si alguna vez interfieren con servicios médicos, policiales o de bomberos pueden ser postergados y ceder el espacio aéreo a estos servicios preferenciales. Algunos ejemplos de las aplicaciones de los UAVs para servicios no prioritarios son el control de tráfico terrestre, la ayuda y monitorización de construcciones urbanísticas, las tomas de muestra para estudios y meteorología y el uso cinematográfico o artístico.

Por último, existen dos tipos más de servicios no esenciales que influyen directamente a la arquitectura que se desea desarrollar y que no se ajustan a los parámetros previamente descritos, éstos son el servicio de transporte de pasajeros y el uso recreativo de UAVs. En referencia al primero, China, Estados Unidos, España [31], Finlandia y Noruega son algunos ejemplos de países cuyas autoridades ya han aprobado que se realicen vuelos de prueba para el transporte de pasajeros mediante UAS en su espacio aéreo. Los Emiratos Árabes Unidos y Singapur, por su parte, han marcado el 2030 como la fecha en que este servicio será completamente operacional para sus habitantes [31-32].

Aunque todavía hay controversia sobre si la implementación de esta aplicación solventará los problemas de congestión actual en zonas urbanas sin generar otros igual de complejos en el ámbito de la economía, la ética y la gestión aeronáutica [29], es irrefutable que la industria está evolucionando para a la larga poder implementar los UAS como una alternativa de este servicio. Dicha implementación, sin embargo, no supondría una gran alteración para el desarrollo que pretende este proyecto, ya que las futuras características de los dos modelos actuales de transporte de pasajeros mediante UAS responden a las mismas necesidades que los b2b y b2c y, por lo tanto, sus operaciones podrían incorporarse a la arquitectura diseñada juntamente con las previamente analizadas del sistema de transporte de mercancías.

En cambio, el uso recreativo de UAVs sí precisa de necesidades extras que se deberán tener en cuenta. Este servicio destinado al ocio de sus usuarios aporta una gran aleatoriedad al sistema, ya que se puede realizar con modelos de UAV muy distintos, durante periodos de tiempo muy heterogéneos y con una alta variedad de operaciones. Además, los usuarios no tienen porqué ser expertos experimentados ni estar aún entrenados para solucionar posibles incidencias críticas. Por estos motivos, el uso recreativo de UAS suele necesitar un espacio libre de otras operaciones. Esta característica puede resultar contradictoria con una arquitectura estructurada que permita a la vez todos los servicios presentados anteriormente, pero el servicio destinado al ocio de la tecnología UAV es fácilmente incorporable si se equipan instalaciones apropiadamente para este uso o si se limitan zonas exteriores específicas alejadas de posibles conflictos.

A partir de ahora la arquitectura que se desarrolle en este proyecto para el transporte de mercancías mediante UAS deberá proporcionar el espacio suficiente para integrar las características y necesidades de los servicios públicos y así, evitar futuras interferencias y conflictos con las operaciones que muy posiblemente la sociedad solicite el día de mañana.

## CAPÍTULO 2. VIABILIDAD LEGAL

Antes de presentar el diseño y los elementos de una arquitectura de transporte de mercancías mediante UAS, es importante analizar la viabilidad legal de este proyecto. De esta forma se identificarán los factores que las autoridades legales consideran claves para los UAS, los reglamentos actuales existentes para las aplicaciones comerciales y qué clase de relaciones se tendrían que desarrollar con las entidades legales para el buen funcionamiento de las implementaciones que pretende este proyecto.

Actualmente cada país cuenta con su propia autoridad legal destinada a regular el uso de los UAVs en su territorio. Por dicha razón, y aunque existan ya unas normas básicas que comparten todas ellas, sigue habiendo una gran heterogeneidad en relación a las regulaciones legales que presentan. Algunas de las autoridades legales competentes más influyentes en el sector de los UAVs son la europea EASA y su reglamentos delegados y de ejecución 2019/945-947 [34], la estadounidense FAA y el código 14 de regulaciones federales Part: 107 [35] y la Administración China de Aviación Civil (CAAC) y su regulación CCAR-92 [36].

En el caso concreto de España, país de desarrollo de este proyecto, la autoridad legal competente a nivel de estado es la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) y la legislación vigente es la referente al real decreto 1036/2017. Sin embargo, como estado miembro de la Unión Europea (UE), a partir del 1 julio de 2020 adoptará los reglamentos 2019/945 y 2019/947 de la EASA. En la *Figura 3* se muestra el proceso de transición de 3 años que se ha previsto para incorporar esta nueva normativa. Como se puede observar se trata de una transición escalonada, empezando el 2020 con la creación de un registro común de operadores europeos y terminando en julio de 2022 con la total implementación de los nuevos reglamentos de EASA.



Figura 3. Proceso de transición del RD 1036/2017 (AESA) al 2019/945-947 (EASA).

Fuente: Normativa comunitaria sobre operaciones con UAS. AESA y Ministerio de Fomento. 2020.

Para implementar un servicio de transporte de mercancías mediante UAS se necesitan aún años de desarrollo y adaptación. Por este motivo, este proyecto se centrará en el reglamento futuro presentado por EASA y no en el vigente de AESA. Además, los reglamentos 2019/945 y 2019/947 serán aplicados a los 27 estados miembros de la UE así como a Islandia, Noruega, Liechtenstein y Suiza. Consecuentemente, si se tiene en cuenta dicha regulación y no la de AESA, se puede contemplar a la vez los requisitos necesarios de todos los países que trabajen bajo este mismo marco regulador y, así, presentar una arquitectura legalmente extensible a más de un territorio.

## 2.1. CATEGORÍAS OPERACIONALES

El artículo 3 del reglamento 2019/945 resulta verdaderamente importante para la aplicación que pretende este proyecto, ya que en él se definen las 3 categorías operacionales posibles y en consecuencia las restricciones y características que se deberán acatar. Las operaciones que incluyen el transporte de mercancías están definidas dentro de la categoría “específica”. Sin embargo, si dicha operación requiere volar por encima de un grupo de personas o transporta mercancías catalogadas como peligrosas, será considerada como categoría “certificada”. Para el tipo de aplicaciones que se han presentado previamente, la única operación “específica” que se podría llevar a cabo es la destinada al transporte de mercancías no peligrosas de los b2b cuyas empresas implicadas se encuentren en una área geográfica cercana y en polígonos alejados de las zonas urbanas. Todas las demás operaciones, sean b2b con empresas ubicadas en zonas urbanas o b2c, deberán atender a los reglamentos de la categoría “certificada”.

Para poder realizar una operación en categoría “específica” se requiere una autorización expedida por la autoridad competente de conformidad con el artículo 12. Dicha autorización precisa de una evaluación de riesgos previa (SORA) para determinar la aceptación de la operación solicitada. Esta evaluación permite identificar todos aquellos requisitos que ha de cumplir el sistema para considerarse seguro y legal basándose en el riesgo de colisión en suelo, en la estrategia y táctica operacional para el riesgo de colisión en aire, en la interacción con las áreas adyacentes y en el nivel de robustez que ha de presentar dicho sistema para cumplir con los requisitos expuestos.

En la SORA, el riesgo de colisión en suelo se refiere a la probabilidad que una persona sea lastimada por el impacto de un UAV. Según EASA, los principales factores que influyen en dicha probabilidad son las dimensiones máximas del vehículo, el tipo de vuelo y el volumen operacional. Los vehículos se clasifican conforme las dimensiones máximas en 4 categorías: de 1 m, de 3 m, de 8 m y mayores a 8 m, siendo la primera la que menos riesgo conlleva y la última la que más.

Referente a los tipos de vuelo, se considera más seguros aquellos que operan de forma continua a la vista del piloto remoto (VLOS) y menos seguros los que lo hacen más allá de la vista del piloto (BVLOS); se debe tener en cuenta que para este apartado las operaciones extendidas de VLOS (EVLOS) serán clasificadas como BVLOS.

Aunque no se cuantifica en la SORA, también es importante definir en la descripción del tipo de vuelo qué nivel de participación humana y qué nivel de automatización va a haber en cada fase de éste [38]. Por su parte, el volumen operacional hace referencia al espacio de vuelo previsto más el espacio de contingencia. Para éste último, los factores influyentes serán la exactitud de la navegación, el error entre la ruta programada y la real y la latencia de las comunicaciones. El volumen operacional también resulta clave para determinar sobre qué zonas a nivel de tierra pueden verse afectadas. Para EASA, la zona terrestre más segura es aquella que está controlada y alejada de poblaciones. Todas las demás, son clasificadas de más a menos segura según el nivel de densidad de población. Finalmente, para determinar la probabilidad de que una persona sea lastimada por el impacto de un UAV es importante estudiar la energía que genera la operación que se desea realizar. Para causar lesiones fatales a un ser humano se necesitan alrededor de docenas de Joules [37], esta energía es muy baja si se compara con la que operan los UAVs en categoría “específica”. Por eso, EASA pone especial atención en medidas de mitigación que puedan reducir dicha energía así como en los primeros auxilios que se puedan prestar a los posibles perjudicados en caso de accidente. Estas dos medidas relevantes para conseguir un UAS seguro y legal serán estudiadas y presentadas más profundamente a lo largo de este trabajo.

Por su parte, el riesgo de colisión en aire se mide mediante la frecuencia de encuentros con otros vehículos aéreos, ya sean tripulados o no tripulados. Según EASA, los factores influyentes para determinar esta frecuencia, y en consecuencia el riesgo de colisión en aire, son el espacio aéreo requerido, la estrategia y táctica operacional y las relaciones establecidas con los proveedores de servicios para la navegación aérea (ANSP).

El espacio aéreo requerido hace referencia al las categorías de la aviación convencional (A, B, C, D, E, F y G) por las que el UAV va a circular, tomando en consideración también el nivel de vuelo previsto para la operación. EASA diferencia los niveles de vuelo de la categoría “específica” entre aquellos superiores al FL600, aquellos que se encuentran entre FL600 y los 500 ft y aquellos que son menores de 500 ft AGL. Los espacios aéreos que se consideran más seguros sin tener en cuenta las estrategias y tácticas operacionales son los atípicos y segregados, seguidos por los que se realizan a niveles de vuelo superiores a FL600 y los que vuelan por debajo de los 500 ft AGL en zonas rurales. Por contrapartida, los considerados menos seguros son los que operan en las categorías B, C y D, entre el FL600 y 500 ft y los que vuelan por debajo de 500 ft AGL en zonas no rurales.

Para disminuir el riesgo de colisión en aire en los espacios previamente presentados existen dos estrategias operacionales. La primera consiste en adaptar el nivel, la hora y la duración del vuelo para reducir la frecuencia de encuentro con otros vehículos, el volumen operacional que interfiere con espacios aéreos menos seguros y el tiempo que se vuela por dichos espacios. La segunda estrategia operacional aplica a las restricciones y normas que las ANSP y las autoridades competentes han determinado para cada categoría de espacio aéreo. Esta estrategia se fundamenta en que todas las operaciones UAS que vuelan en espacios controlados deben adaptar por un lado las rutas a la estructura existente y, por el otro, la tecnología de su vehículo a la misma que se les exige a los vehículos aéreos convencionales. Esta adaptación puede resultar muy útil si se pretende realizar una operación que cumple todos los requisitos legales pero que necesita cruzar espacios de categoría B, C o D.

Sin embargo, las estrategias operacionales no son las únicas mitigaciones existentes para reducir el riesgo de colisión en el aire y, por eso, la SORA también contempla la táctica operacional. Esta táctica se centra en el tipo de resoluciones que el sistema tiene previsto realizar en caso de que haya un conflicto con otro vehículo. La más sencilla de todas es garantizar una operación VLOS. Pero, como es de suponer, no siempre será posible este tipo de vuelo para todas las fases de todas las rutas y, en consecuencia, otras tácticas tendrán que ser utilizadas. Según el riesgo existente del espacio aéreo y teniendo en cuenta las estrategias operacionales, las tácticas necesarias para la resolución de conflictos se organizan de más eficaces a menos de la siguiente manera: obligatoriedad de un sistema reconocido de detección y resolución (DAA) como el RTCA SC-228 y el EUROCAE WG-105, obligatoriedad de un DAA compatible con la aviación civil y obligatoriedad únicamente de un sistema de detección de conflictos. El ratio de riesgo de estos sistemas son respectivamente 0,1 , 0,33, 0,66 e inexistente para las operaciones VLOS [37].

A partir del riesgo en tierra y las estrategias y tácticas operacionales, la SORA analiza el nivel de robustez que se debe cumplir para 24 objetivos de seguridad operacional (OSO) propuestos por EASA. Dicha robustez se clasifica en baja, mediana y alta, y no es más que el mínimo entre las medidas de seguridad que se han previsto acatar y las pruebas que demuestran que éstas medidas se han preparado adecuadamente. Para demostrar que las medidas de seguridad son adecuadas frecuentemente se necesita una comprobación de terceros, evidencias que sólo los fabricantes pueden facilitar o pruebas de las autoridades competentes y de las ANSP.

Para finalizar, la SORA estudia también las consideraciones de las áreas adyacentes. Lo que en otras palabras se puede definir, como el riesgo de que un fallo en el sistema implique una pérdida de control del vehículo y, consecuentemente, una infracción en los espacios aéreos y terrestres colindantes a la operación. Según EASA la probabilidad de que esto suceda debe ser de igual o menor de  $10^{-4}/FH$  y, además, ningún fallo único del UAS o de los sistemas de ayuda debe poder provocar la pérdida de control del vehículo.

Para garantizar esto, el UAS debe de tener sistemas redundantes e independiente, los softwares y hardware de la electrónica del UAV deben de seguir los estándares establecidos para la industria y las afectaciones del sistema por el clima y las interferencias electromagnéticas deben de haber sido previstas con antelación.

Por su parte, y según los reglamentos 2019/945 y 2019/947, las operaciones de categoría “certificada” deberán de cumplir las mismas leyes y restricciones que la aviación tripulada convencional y, por lo tanto, el transporte de mercancías mediante UAS que presenta este proyecto para los b2c y los b2b de empresas ubicadas en zonas urbanas será legalmente inviable. Aún así, la industria de los UAS sigue evolucionado y, como demuestran los reglamentos citados, las leyes también. Por lo tanto, teniendo en cuenta las aplicaciones ventajosas que se han descrito en los apartados anteriores, el día que la industria desarrolle la tecnología necesaria que permita operar de forma segura en categoría “certificada” es de suponer que, tarde o temprano, las leyes también lo harán.

Por lo que refiere a este proyecto, y ya que la categoría “certificada” no está aún adaptada para el uso de UAS, en los siguientes apartados se utilizará la SORA como punto de partida para analizar y desarrollar los factores que se consideran claves a día de hoy, así como para definir las relaciones entre los interesados en utilizar el espacio aéreo y las autoridades que lo regulan.

## 2.2. CATEGORÍAS DE UAVs

Más allá de definir las categorías operacionales, el reglamento 2019/945 también especifica mediante su anexo las diferentes categorías de UAVs existentes según la ley. Dicha clasificación se basa en las características propias de los vehículos para determinar un conjunto de limitaciones operacionales y de prestaciones que éstos deberán cumplir. Para poder ser catalogados en una categoría o en otra, los UAVs tendrán que ajustarse las características propias así como las limitaciones y prestaciones que requieren. Está clasificación resulta importante para el transporte de mercaderías mediante UAS ya que marca el tipo de operación que puede realizar cada UAV y, además, establecer un primer filtro para determinar qué vehículo deberá utilizar cada empresa para las operaciones que deseen llevar a cabo.

En la *Figura 4* se encuentran definidas las categorías de los UAVs. El acrónimo MMD presente en la figura hace referencia a la masa máxima al despegue, en la cual se incluye ya la carga útil. Otra información que se necesita matizar es la relacionada con la altura máxima, ya que para el buen entendimiento de esta limitación se debe tener en cuenta que dicha altura estará siempre referenciada al punto de despegue. El C2 link, por su parte, hace referencia al enlace de datos entre el vehículo y el piloto o la estación tierra.

Para que el C2 link sea seguro el UAV debe de tener un enlace protegido contra el acceso no autorizado y la habilidad de poder recuperar la conexión si ésta alguna vez falla. En caso que la recuperación del enlace no sea posible, para garantizar un C2 link seguro, el UAV debe de ser capaz por sí mismo de finalizar la operación pertinente de inmediato.

	C0	C1	C2	C3	C4
MMD	250 g	900 g	4 kg	25 kg	25 kg
Max. Speed	19 m/s	19 m/s	N/A	N/A	N/A
Max Alt.	120 m	120 m	120 m	120 m	N/A
Licensed pilot	No	No	Yes	Yes	No
Voltage	24 V	24 V	48 V	48 V	N/A
Low speed mode	No	No	Yes	No	No
Secured C2 link	No	Yes	Yes	Yes	No
Visual id	No	Yes	Yes	Yes	No
Lights	No	Yes	Yes	Yes	No
Low battery control	No	Yes	Yes	Yes	No
Geopresence	No	Yes	Yes	Yes	No

Figura 4. Clasificación de los UAVs.

Fuente: Specific Operations Risk Assessment v2.0. Ajuntament de Barcelona. 2019 [37].

Lo primero que se debe destacar de la *Figura 4* es que la C4 no está sujeta a ninguna restricción porque se trata de una categoría pensada para no excluir de la legalidad el aeromodelismo. Para poder definir mejor este propósito, el reglamento impone que los vehículos de esta categoría no pueden disponer de modos de control automático excepto para la asistencia a la estabilización del vuelo. Consecuentemente, y justamente por esta razón, los UAVs catalogados como C4 no son potencialmente utilizables para el transporte de mercaderías mediante UAS y por lo tanto serán excluidos de las consideraciones que se hagan en este proyecto.

La categoría operacional “abierta” es la única que tiene limitadas diferentes operaciones según la categoría del UAV empujado. Por extensión, legalmente se puede solicitar una autorización para operar en categoría “específica” y “certificada” con vehículos catalogados como C0, C1, C2 y C3. Se debe de tener en cuenta que, independientemente de su categoría, todos los UAVs involucrados en una arquitectura de transporte de mercancías tendrán que estar previamente certificados y, además, deberán de tener una identificación a distancia que difunda de forma periódica y directa el número de registro del operador, el número de serie físico único del UAV, la posición geográfica de éste incluyendo la altura, la trayectoria medida y la ubicación del piloto a distancia o, si no se dispone de ella, del punto de despegue.

Otra limitación impuesta por la regulación recae en en la potencia acústica ( $L_{WA}$ ) generada por los vehículos. Aquellos UAVs con una MMD entre 250 g y 4 kg, es decir los C1 y C2, deberán de tener un nivel máximo de  $L_{WA}$  tal y como se expone en la *Figura 5*.



Clase de ANT	MMD $m$ en gramos	Nivel máximo de potencia sonora $L_{WA}$ en dB		
		a partir de la entrada en vigor	a partir de 2 años después de la entrada en vigor	a partir de 4 años después de la entrada en vigor
C1	$250 \leq m < 900$	85	83	81
C2	$900 \leq m < 4\,000$	$85 + 18,5 \lg \frac{m}{900}$	$83 + 18,5 \lg \frac{m}{900}$	$81 + 18,5 \lg \frac{m}{900}$

Figura 5. Nivel máximo de  $L_{WA}$  para C1 y C2.

Fuente: Reglamento de ejecución (UE) 2019/947 [34].

Para reducir los posibles riesgos de las operaciones UAS, la legislación también tiene en consideración a los UAV cautivos y las características que deben de tener sus respectivos anclajes. Sin embargo, dado las aplicaciones que persigue este proyecto las operaciones con vehículos cautivos no serán de interés y por lo tanto dichas consideraciones serán intrascendentes.

Gracias a la clasificación de los UAVs se puede identificar las características básicas que deberán tener los vehículos para el transporte de mercancías mediante UAS y, a la vez, detectar los parámetros que serán limitantes a la hora de definir las operaciones o de implementar nuevas características a los UAVs. Aún así, es importante tener en cuenta que estas regulaciones van a evolucionar durante el tiempo y, por lo tanto, la arquitectura presentada estará regida por esta clasificación pero no será exclusiva a ella. De esta forma se pretende que la arquitectura sea adaptable a la tecnología venidera y a los cambios que sufra la legalidad vigente. Un ejemplo de posible modificación que podría afectar a los reglamentos 2019/945 y 2019/947 es justamente la ampliación de la catalogación mostrada en este apartado mediante la implementación de las categorías C5 y C6 [41].

## 2.3. DIFICULTADES LEGALES Y POSIBLES SOLUCIONES

Por todo lo presentado, las implementaciones de una arquitectura de transporte mediante UAS son o ilegales o requieren largos procesos burocráticos. Como es entendible, dado la importancia de la seguridad en esta clase de operaciones, la realización de la SORA y la posterior evaluación por parte de las autoridades requieren de un estudio exhaustivo que puede llegar a alargarse durante meses. Esta tipo de metodología contrarrestar con todas las ventajas comerciales de los UAS tanto en la mejora del tiempo de servicio como en su aplicación para resolver las emergencias logísticas de las empresas.

Una solución que tiene prevista EASA para mejorar el tiempo de espera se encuentra en el uso del apartado 5 del artículo 5 de la regulación 2019/947. Dicho apartado permite requerir una autorización para volar en categoría “específica” sin tener que presentar la SORA, ya que se alega que la operación se realizará según los parámetros y los límites de un escenario estándar (STS). Estos escenarios se encontrarán descritos en el Apéndice 1, que a fecha de este trabajo aún está pendiente de ser publicado.

Los elementos por los que se clasificarán los STS son el nivel de intervención humana, las áreas sobrevoladas, las limitaciones del UAV, las limitaciones del espacio aéreo, el tipo de vuelo, la altura del vuelo, la altitud límite, el tipo de operación llevada a cabo, el riesgo en tierra, aire y áreas adyacentes, la robustez solicitada al operador, los requisitos del personal involucrado y los requisitos técnicos de los sistemas externos de soporte a la navegación [39].

Sin embargo, la creación de los STS se puede terminar convirtiendo en una disyuntiva. Si las restricciones que presentan son demasiado genéricas se pueden terminar usando como una *checklist* para conseguir una autorización operacional de forma rápida, cuando la auténtica finalidad del estudio de riesgos es encontrar la forma de hacer seguro y legal un UAS y no la de adaptar por completo la operación a la legalidad. Este hecho provocaría que muchos sistemas de UAVs no fueran todo lo eficiente que pudieran ser y, por lo tanto, que no pudiera llegar a prestar algunas de sus aplicaciones y ventajas. Por contrapartida, si los STS son demasiado específicos se corre el riesgo de que al final, para demostrar a que reglamento se acoge el operador, éste tenga que presentar la misma documentación que la que propone la SORA convencional y consecuentemente los STS perderían el motivo de su creación, que es el de agilizar los trámites legales y reducir la carga de trabajo burocrática previa a la operación. Además, los STS demasiado específicos también pueden terminar siendo aplicables solamente en casos muy concretos, dejando así excluidas zonas, que por sus necesidades particulares, requieren de características que no contemplen.

La idea original de EASA es que los STS sean iguales para todos los territorios y se apliquen para solicitar una autorización operativa cuando las características de los elementos previamente mencionados de una operación sean las mismas que se describen en ellos. Tal y como se ha expuesto anteriormente, si estos escenarios no se establecen correctamente, o bien serán genéricos y harán que en algunos casos se gasten recursos de forma innecesaria y/o se reduzca la eficiencia de la operación por motivos superfluos, o bien serán muy específicos y harán de ellos mismos una herramienta inaccesible para muchas operaciones y de una carga burocrática parecida a la de la SORA. Una posible solución a la disyuntiva que se acaba de presentar recae en en los lugares geográficos en los que los STS son válidos. Si el UTM/U-Space se organiza por áreas geográficamente reducidas y se estudian dichas áreas de forma individual para que cada una de ellas tenga unos STS únicos y específicos, se puede lograr que los STS resultantes sean más eficientes, más adaptados a las necesidades del espacio donde se vayan a ejecutar y más rápidos de presentar y aprobar.

Si las autoridades competentes poseen previamente las características relativas al estudio de cada área reducida los operadores únicamente deberán justificar como su operación se adapta a éstas y, de esta forma, no tendrán que presentar cada vez el porqué de dichas adaptaciones. Esta información propia de cada zona ya se encontrará evaluada y considerada por las autoridades en los STS únicos y específicos que se permiten en cada una de ellas.

Además, si se focaliza la normativa por espacios reducidos, al solicitar una autorización operacional, la información entregada a las autoridades competentes estará más centrada en los problemas específicos y reales del espacio en cuestión y no en otros que, quizás, sí contemplan los STS aplicables de igual forma para todos los territorios y que conllevan un alteración innecesaria de la operación o un incremento redundante de información.

A lo largo del proyecto estas áreas geográficamente reducidas que se han mencionado se las nombrará sectores. Con el fin que esta metodología sea funcional, estos sectores debería de ser definidos como perímetros cerrados del U-Space que comprenden puntos que comparten las mismas características del espacio aéreo y del espacio terrestre.

Tal y como se ha indicado, para poder definir STS únicos para cada sector se requiere un análisis previo de cada uno de ellos. Por eso, una de las maneras de determinar dichos STS sería aplicar para el sector que se desee regular una metodología similar a la que se usa para la evaluación de la seguridad del U-Space (MEDUSA). A partir de aquí se puede empezar a deducir las características operacionales que precisan los STS concretos de ese espacio e, incluso, algunas de las mitigaciones más importantes que precisan.

Para poder comprender de una mejor forma los conceptos y ventajas que supondría la implementación de STS por sectores se encuentra adjunto en el [Anexo 1](#) un breve ejemplo explicativo y didáctico. En él se describe el funcionamiento de estos STS y se argumenta sobre sus virtudes tanto para los operadores como para las autoridades competentes.

Asimismo, y en relación con las aplicaciones que persigue este proyecto, este modelo también supondría una mejora para las empresas que estén interesadas en el transporte de mercancías mediante UAS en la categoría “específica”, ya que si los STS resultan ser concretos y eficaces hay más posibilidad que se ajusten a sus necesidades y, por lo tanto, que éstos se puedan llegar a usar como una herramienta rápida para solicitar sus autorizaciones. Sin embargo, si la ventana de tiempo que dichas autorizaciones ofrecen para operar es muy pequeña o si solamente sirven para una o un número reducido de operaciones, la respuesta de las autoridades competentes sobre las solicitudes bajo las STS tendrá que ser muy rápida, para así poder gestionar las numerosas operaciones que se prevén y aumentar la flexibilidad que éstas puedan necesitar. Es importante enfatizar aquí la importancia del término “respuesta rápida”, ya que el uso que se ha identificado que darían los UAS a las empresas que pueden operar en categoría “específica”, es decir a las b2b situadas en polígonos o espacios alejados de las zonas urbanas, va directamente relacionado con la eficiencia y la veloz respuesta que éstos pueden proporcionar.

Por los motivos expuestos en el párrafo anterior, una de las principales propuestas de este proyecto para implementar de forma eficaz una arquitectura de transporte de mercancías mediante UAS, juntamente con la creación de los sectores y los STS por sectores, es la automatización de las solicitudes para las autorizaciones aplicables a los STS. Para llevar ésto a cabo se precisa de un software capaz de analizar y responder rápidamente la información presentada por parte de los operadores. Esta metodología no es diferente a la que existe actualmente para la aviación civil convencional, que a través de introducir la información codificada de un plan de vuelo en el Free Text Editor del NOP Portal de Eurocontrol, se puede automáticamente validar y aceptar la operación (ACK), dejarla pendiente para las consideraciones que se crean oportunas (MAN) o rechazarla directamente (REJ). De esta forma aumenta la eficiencia y rapidez cuando se tienen que tramitar muchas solicitudes diferentes y se reduce la carga de trabajo tanto de los operadores como de las autoridades competentes. Para poder realizar validaciones a través de esta metodología se necesita un nivel de robustez bajo para las justificaciones pertinentes y, por eso, previamente se debe certificar los operadores, las zonas donde éstos tienen permiso para volar y los UAVs que van a utilizar. Algo que EASA ya ha previsto en sus reglamentos 2019/945 y 2019/947.

Si se desean crear STS específicos para áreas geográficamente más pequeñas, el número de diferentes STS aumenta considerablemente y por lo tanto, también aumenta la cantidad de estudios que se deben realizar para tener el UTM/U-Space completamente regulado. Una posible manera de gestionar el volumen de todos los estudios necesarios es delegar dicha tarea a autoridades próximas a los sectores que se desean regular. Así, se reparte la carga de trabajo que supone estudiar sectores y generar STS específicos para cada uno ellos. Para terminar el proceso, EASA debería aprobar los requerimientos de cada sector presentado por las autoridades delegadas e introducir la información pertinente a una base de datos comuna para todas ellas.

Con el objetivo de que los STS específicos se actualicen a los cambios y necesidades que puedan sufrir los sectores, la aceptación de dichos sectores por parte de la EASA debería de ser temporal. Así, cada x años las autoridades delegadas tendrán la oportunidad de renovarlos con las mismas características y los mismos STS o de presentar las actualizaciones que consideren pertinentes.

Otra problemática que puede generar esta metodología es saber como se debe tratar las solicitudes que desean operar en más de un sector y acogándose a más de un STS. Sin embargo, ésto tiene fácil solución. Para proporcionar la mejor seguridad posible, la operativa en cuestión deberá acatar las normativas de los STS por los que circula en aquel momento y, a la vez, el UAV tendrá que cumplir con las características más restrictivas de todas las que requieren todos los STS a los que se ha acogido la operativa en su solicitud.

Finalmente, también se tiene que tener en cuenta que en un futuro habrá nuevas implementaciones que ayudarán notablemente a la seguridad, eficiencia y gestión de los UAS y, consecuentemente, a justificar más rápidamente la legalidad de éstos. Dos ejemplos claros son la organización de las zonas sin drones (NDZ), limitadas de drones (LDZ) y exclusivas de drones (EDZ) y la aparición de los ANSP específicos para el U-Space, que proporcionan servicios tan importantes como: Identificación y *tracking*, administración del espacio aéreo y *geo-fencing*, administración de los planes operacionales, resolución de conflictos, respuesta de emergencia, monitoreo, tratamiento de la información ambiental (tiempo, densidad de poblaciones, cobertura de navegación...) y interacciones con los controladores de tráfico aéreo (ATC) [40].

La Figura 6 expuesta a continuación se ha diseñado para resumir de forma más visual la metodología propuesta en este trabajo para un sistema automático de validación de los STS definidos por sectores.



Figure 6. Esquema para la automatización de las validaciones de los STS definidos por sectores.

Fuente propia.

Obviamente, todavía hay mucha más recerca que se necesita desarrollar para determinar la mejor estrategia organizativa y, lo presentado a través de este apartado, es solamente una propuesta a largo plazo de cómo se podrían adaptar las regulaciones presentes a las futuras necesidades de los usuarios, así como de las empresas interesadas en el transporte de mercancías mediante UAS. Referente a la disyuntiva discutida sobre los STS hace falta matizar que a fecha de este trabajo no han sido publicados aún y que por lo tanto, no se puede saber con certeza qué efectos van tener. Sin embargo, lo que sí se sabe ya, es que todavía no van a ser la respuesta para automatizar autorizaciones. Algo que, teniendo en cuenta la experiencia de la aviación convencional, va a ser necesario para gestionar la creciente demanda y la flexibilidad que se exigirá a los UAVs. Si los STS no son la herramienta utilizada para automatizar las autorizaciones, otros protocolos se tendrán que desarrollar para este fin, y no únicamente para la categoría “específica”, sino que en el futuro también se tendrá que encontrar la forma de extrapolar esta metodología a la categoría “certificada”. Como apunte final, se debe también mencionar la ambigüedad de los reglamentos 2019/945 y 2019/947 respecto a lo que se considera densidad de población dispersa y concentraciones de personas, así como la poca presencia de limitaciones y riesgos para los UAVs que utilizan combustibles fósiles. Algo que, sin duda, EASA deberá matizar en futuras actualizaciones del reglamento.

## **CAPÍTULO 3. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS**

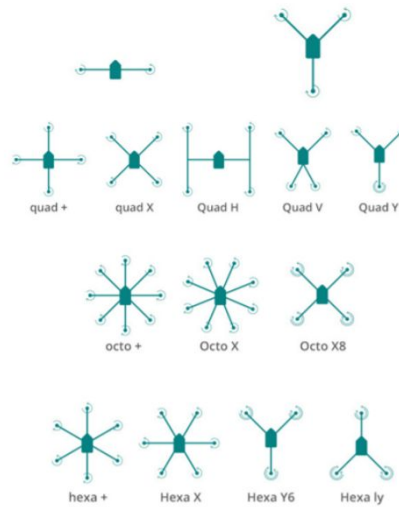
Uno de los elementos más importantes para una correcta implementación de una arquitectura destinada al transporte de mercancías mediante UAS son los UAVs. Al fin y al cabo van a ser éstos los que circulen por ella y, consecuentemente, van a ser sus características las que en gran medida determinan el mejor diseño posible de la arquitectura en cuestión. Obviamente, son muchos los elementos que constituyen a un UAV así que, con el objetivo de focalizar el estudio en aquellos más relevantes para el desarrollo del proyecto, este apartado se centrará únicamente en cuatro factores: la masa máxima de carga útil, la duración del tiempo de vuelo, la seguridad y los sistemas necesarios para el buen funcionamiento de las operaciones. De esta forma se pretende identificar las operaciones que pueden realizar los vehículos, cuál de ellos es el más idóneo para cada situación y los problemas que éstos podrían presentar.

Según el método que los UAVs empleen para generar sustentación se pueden clasificar en tres clases distintas: los de ala fija, los de ala giratoria y los aerostáticos. En este proyecto se ha decidido focalizarse mayormente en los de ala giratoria ya que, a diferencia de los de ala fija, pueden realizar despegues y aterrizajes de forma vertical (VTOL) y, por lo tanto, no precisan de grandes infraestructuras terrestres ni de mucho espacio para efectuar las primeras y últimas fases del vuelo. A la vez, y aunque los aerostáticos pueden proporcionar soluciones más ecológicas, los de ala giratoria también ofrecen mejores prestaciones en comparación a éstos. Concretamente poseen un mejor ratio de sustentación-volumen y un mayor control sobre la navegabilidad, dos características que son claves para mejorar respectivamente la eficiencia y la seguridad de una arquitectura de transporte aérea.

### **3.1. ESTRUCTURA**

En este proyecto se entiende por estructura el esqueleto del vehículo que sujeta todos los elementos del UAV. La estructura consta de un cuerpo central donde se encuentra el procesador y el sistema eléctrico encargado de generar energía. En el caso de que el vehículo sea propulsado por carburantes dicho cuerpo tendrá adherido un tanque de almacenaje. Para los UAVs de ala giratoria, la estructura también presenta un tren de aterrizaje, dos o más brazos destinados a aguantar los rotores y un anclaje debajo del cuerpo para transportar la carga útil. Ya que no todos los modelos de sensores y antenas presentan el mismo funcionamiento, estos elementos no suelen tener una ubicación preestablecida y, para optimizar el espacio, normalmente se distribuyen en la más conveniente de las partes ya mencionadas de la estructura.

Los elementos más influyentes en la estructura son los rotores y los brazos en los éstos que se sujetan. Los UAVs de ala giratoria, también conocidos como multirrotores, generan la sustentación necesaria para operar a través de como mínimo dos rotores, siendo el tamaño, el número y la configuración de éstos respecto al centro de gravedad del vehículo factores decisivos para la estructura y, en consecuencia, para las futuras prestaciones que el UAV pueda ofrecer. En función de la cantidad de rotores que el vehículo presente, se clasifican en bicópteros (de 2 rotores), tricópteros (de 3 rotores), cuadricópteros (de 4 rotores), hexacópteros (de 6 rotores) y octocópteros (de 8 rotores). Se debe de tener en cuenta que para aumentar la estabilidad y contrarrestar el momento generado por los rotores, estos UAVs suelen disponer de una distribución simétrica y del mismo número de rotores girando tanto en sentido horario como antihorario. Con el objetivo de mejorar la comprensión de las configuraciones que se mencionan más adelante, en la *Figura 7* se presentan las más habituales de para los UAVs de ala giratoria.



*Figura 7. Configuraciones más habituales de los UAVs multirrotores.*

. Fuente: *Drones and Possibilities of Their Using*. Piotr Kardasz. 2016. DOI: 10.4172/2165-784X.1000233.

Para determinar la influencia del número de rotores en los UAVs se expone, en la Ecuación (3.1.), la fórmula del movimiento lineal del modelo dinámico de multirrotores mediante la segunda ley de Newton [42]. Es importante matizar, que en esta ecuación, el empuje generado por los motores siempre sigue la dirección positiva del eje vertical del sistema de coordenadas “B” asociado al cuerpo del UAV, y que por convención, este eje vertical es asignado a la tercera coordenada de dicho sistema. Además, como es más intuitivo y sencillo analizar todos los términos de la ecuación bajo el punto de vista de ejes inerciales “E”, aquellos elementos representados en un sistema de coordenadas “B” precisan de una rotación mediante los ángulos de Euler.

$$mv(t)' = R_{B/E}(t) e_3^B f_T(t) + f_D(t) + mg \quad (3.1.)$$

$$f_T(t) = \sum_{n=1}^{nt} f_n(t) \quad (3.2.)$$

$m$  representa la masa total del vehículo incluyendo la carga útil,  $v$  el vector  $[V_x, V_y, V_z]^T$  de la velocidad inercial,  $R_{B/E}$  la matriz de rotación de los ejes “B” del cuerpo del UAV a los ejes “E” inerciales,  $e_3^B$  el vector unitario  $[0, 0, 1]^T$  para la tercera componente en el eje “B”,  $f_T$  el empuje total generado por todos los motores,  $f_n$  el empuje de un solo motor,  $nt$  el número total de rotores,  $f_D$  el drag ocasionado por la operación y  $g$  la aceleración gravitacional  $[0, 0, -g]^T$ .

Suponiendo que la masa del vehículo sin la carga útil no se puede reducir más y que los rotores están diseñados para generar sustentación adicional a la necesaria para contrarrestar al drag que ocasionan y a su propio peso, es fácilmente apreciable mediante la Ecuación (3.1.) y (3.2.) que a mayor número de motores, mayor será la masa que el UAV podrá transportar. Sin embargo, como se demuestra gracias a la Ecuación (3.6.), des del punto de vista de la eficiencia es más rentable acrecentar el empuje a base de aumentar el tamaño de los rotores y no de añadir más de ellos. De esta forma se mejora la eficiencia a la vez que se reduce el número necesario de rotores, de brazos, de unidades de control y de accesorios presentes en un UAV.

$$\dot{m}(t) = \rho S v_i(t) \quad (3.3.)$$

$$f_n(t) = \dot{m}(t) v_i(t) = \rho S v_i(t)^2 \quad (3.4.)$$

$$v_i(t) = \sqrt{\frac{f_n(t)}{\rho S}} \quad (3.5.)$$

$$P_n(t) = \dot{E}(t) = \frac{1}{2} \dot{m}(t) v_i(t)^2 = \frac{f_n^{3/2}(t)}{2 \cdot \sqrt{\rho S}} \quad (3.6.)$$

Para la Ecuación (3.3.), (3.4.), (3.5.) y (3.6.),  $\dot{m}$  representa el flujo másico,  $v_i$  la velocidad inducida,  $S$  la área efectiva del rotor,  $P_n$  la potencia requerida del rotor  $n$  y  $\rho$  la densidad del aire, que se puede considerar constante teniendo en cuenta el tipo de operaciones que los UAVs van a realizar en la arquitectura que presenta este proyecto.

Aunque se trate de una modelización simple, en la Ecuación (3.6.) ya se puede identificar una relación inversa entre la  $S$  y la  $P_n$ . Es decir, cuanto mayor sea la área efectiva del rotor menor va a ser la potencia necesaria para generar el mismo empuje. La *Figura 8* representa gráficamente este fenómeno mediante la *power loading* y el *disk loading*, que simbolizan respectivamente el ratio entre el empuje y la potencia requerida y el ratio entre el empuje y la área del rotor. Si es verdad que los valores que ésta muestra son para un modelo concreto de motor cicloidal, de ella también se extrae otra lectura importante: el modelo de aspa del motor no es lo suficientemente influyente como para contrarrestar el efecto que causa su longitud, pero sí lo es como para aumentar notablemente la eficiencia del sistema de propulsión.



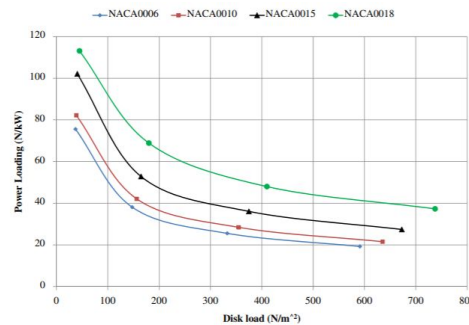


Figura 8. Power Loading vs. Disk Loading para distintos modelos de aspas.

Fuente: Numerical Modelling of Geometrical Effects in the Performance of a Cycloidal Rotor [43].

Por todo lo expuesta hasta ahora, puede parecer que es mucho mejor disminuir el número de rotores y aumentar el tamaño de éstos. Sin embargo, las estructuras de los UAVs que optan por focalizarse en este modelo presentan una nueva problemática: el aumento de su envergadura. Teniendo en cuenta que algunos vehículos deberán volar en zonas urbanas y que puede existir un gran densidad de operaciones en ellas, su envergadura podría resultar un factor limitante para las aplicaciones que pretendan realizar y para la eficiencia de la propia arquitectura en la que circulen. Ya que, si aumenta el tamaño de los UAVs, disminuye el número de operaciones seguras que se pueden realizar a la vez en un mismo espacio. Un ejemplo de esta problemática se puede encontrar en la aviación convencional, donde con el paso de los años algunos espacios aéreos han visto reducida la eficiencia por su alta demanda operacional, obligando a las autoridades a presentar nuevas metodologías como la RVSM para poder absorber más operaciones en el mismo volumen espacial. Considerando todo lo presentado, si se quiere determinar la mejor estructura de un vehículo se debe tener en cuenta la operación que se desea realizar y el *trade-off* que se acaba de exponer entre el número de rotores y sus dimensiones, o en otras palabras, entre la eficiencia del UAV y las limitaciones operacionales a las que éstos pueden verse afectados.

Añadir motores para generar más empuje o agrandar la superficie de los rotores para mejorar la eficiencia, implica intrínsecamente un aumento del ratio entre el volumen y el empuje del UAV. Como se ha mencionado, si este ratio se acrecienta lo suficiente puede llegar a convertirse en limitante para algunas operaciones y para la eficiencia de la propia arquitectura. Una posible solución para evitar llegar a este punto es la implementación de una configuración coaxial. Véase en la *Figura 9* como esta configuración consiste en instalar en un mismo brazo dos rotores paralelos, alineados en el mismo eje vertical y girando en sentido opuesto.

Tal y como muestra la *Figura 10*, la configuración coaxial permite con la misma potencia aumentar el empuje y consecuentemente la masa que el UAV puede transportar. Al mismo tiempo, como sus dos rotores giran en sentidos opuestos, desaparece la necesidad de estructuras con brazos pares y por lo tanto se puede reducir el volumen del vehículo, las posibles limitaciones operacionales derivadas del tamaño de éste y la probabilidad de afectar a la eficiencia de la arquitectura por la que se circula.

Sin embargo, es importante matizar que debido al efecto aerodinámico que ejercen los rotores coaxiales entre ellos, existe una pérdida de potencia en comparación a dos rotores únicos equivalentes configurados por separado. Esta pérdida está estipulada teóricamente alrededor del 26% mediante la teoría del momento de elementos con aspas, aunque es optimizable y mejorable si se ajustan las dimensiones de la separación entre los rotores [46] o si aprovecha parte del volumen ahorrado en aumentar el tamaño de la área afectiva de los rotores. En definitiva, la configuración coaxial es una estrategia viable para acrecentar el empuje respecto a los rotores únicos a la vez que se disminuye el tamaño del UAV pero, siempre se debe tener en cuenta que a nivel de eficiencia son peores que los sistema de propulsión equivalentes con una configuraciones de rotores separados.

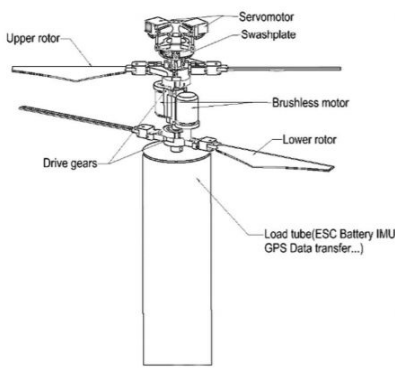


Figura 9. Diseño de un rotor coaxial.

Fuente: Longitudinal Attitude Control Decoupling Algorithm [44].

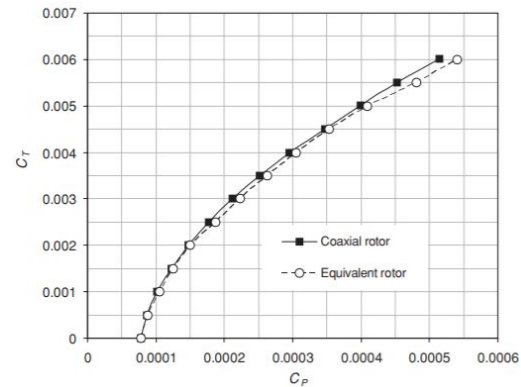


Figura 10. Comparativa del Empuje (ct) vs. Potencia (cp) entre un rotor coaxial y un rotor único.

Fuente: A Comparison of Coaxial and Conventional Rotor Performance [45].

A la hora de determinar la mejor estructura de un UAV destinado a transportar mercancías también se debe tener en cuenta la seguridad operacional. Concretamente, se debe de contemplar la controlabilidad de los vehículos cuando sucede un fallo de rotor. Dicha controlabilidad se puede determinar de forma simplificada generando un sistema a partir de las ecuaciones del momento causado por el empuje de los rotores y calculando los grados de libertad resultantes después de considerar el fallo de rotor.

$$L = \sum_{i=1}^{nt} s df_i(t) \sin(\varphi_i) \quad (3.7.)$$

$$K = \sum_{i=1}^{nt} s df_i(t) \cos(\varphi_i) \quad (3.8.)$$

$$N = \sum_{i=1}^{nt} s K_m f_i(t) \quad (3.9.)$$

$$0 \leq f_{min} \leq f(t)_i \leq f_{max} \quad (3.10.)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ K \\ N \\ f_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sdsin(\varphi_i) & \dots & sdsin(\varphi_{nt}) \\ sdcos(\varphi_i) & \dots & sdsin(\varphi_{nt}) \\ sK_m & \dots & sK_m \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_i(t) \\ \dots \\ f_{nt}(t) \end{bmatrix} \quad (3.11.)$$

$L$ ,  $K$  y  $N$  simbolizan respectivamente el momento en *roll*, *pitch* y *yaw* causado por los rotores.  $d$  y  $\varphi$  son la distancia y el ángulo del rotor en el plano horizontal respecto al centro de gravedad del UAV,  $K_m$  es una constante lineal que relaciona el empuje con el momento en el eje vertical y,  $s$ , es una variable booleana que prende el valor 1 o -1 según la dirección en la que gira el rotor. La Ecuación (3.10.), por su parte, establece las restricciones del sistema. Si se consideran  $d$ ,  $s$ ,  $K_m$  y  $\varphi$  parámetros conocidos y constantes, se puede simular un fallo de rotor sustituyendo por 0 el empuje del rotor averiado y todos los valores de su respectiva columna en la matriz de la Ecuación (3.11.). De esta forma, mediante los grados de libertad de dicha ecuación, es posible determinar la controlabilidad total y el empuje resultante del vehículo tanto antes como después de la avería.

Tomando la Ecuación (3.11.) y las consideraciones presentadas en el párrafo anterior, es fácilmente deducible que los UAVs con menos de 4 rotores, aun siendo físicamente capaces de generar sustentación, presentan por defecto un bajo nivel de controlabilidad y una aún peor respuesta cuando ocurre un fallo de motor. Por esto, este tipo de vehículos no son recomendables para una arquitectura de transporte de mercancías, ya que, la única operación que se podría plantear para ellos es aquella en que la zona terrestre debajo de su volumen operacional esté completamente controlada y mitigada.

Por su parte, los cuadricópteros son totalmente controlables cuando todos los rotores funcionan correctamente. Sin embargo, después de un fallo de rotor se vuelven parcialmente controlables y, para seguir manteniendo cierta estabilidad en el vuelo y realizar un aterrizaje de emergencia, se debe de renunciar al canal de control del *yaw* y modular únicamente el *roll* y el *pitch* del vehículo. En la *Figura 11* se muestra un ejemplo de cómo reaccionaría un UAV en esta situación.

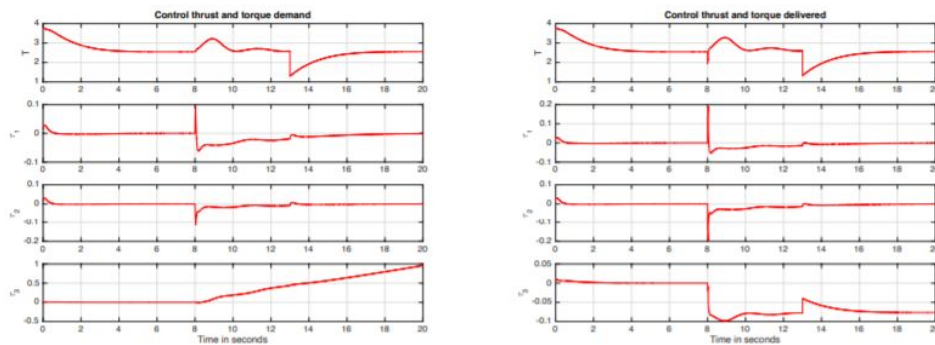


Figura 11. Comparativa entre la demanda y la operativa real después de un fallo de rotor en  $t = 8s$ .

Fuente: Identification and reconfigurable Control of Impaired Multi-Rotor Drones [48].

Como se puede observar, el empuje requerido después del fallo de rotor se estabiliza en el mismo valor que antes de la avería. Teniendo en cuenta que uno de los rotores está inactivo, el resto de ellos tiene que poder generar el empuje mínimo más la parte proporcional del empuje mínimo del rotor inoperativo. Por dicha razón, cuando en una operación se estime la carga máxima que un UAV puede transportar, se deberá aplicar un margen para que el vehículo puede seguir generando el empuje mínimo requerido durante un fallo de rotor.

De la misma manera, los haxacópteros y octocópteros son estructuras totalmente controlables antes de un fallo de rotor. Sin embargo, a diferencia de los cuadricópteros, el cálculo de la controlabilidad cuando se considera una avería no se puede realizar directamente a través de la Ecuación (3.11). Distintas estrategias son aplicables para desarrollar dicho cálculo, pero en este proyecto se tomará en consideración la realizada mediante la pseudoinversa de de Moore-Penrose. Ya que, utilizando esta estrategia, la Ecuación (3.11) no sólo permite calcular los grados de libertad del sistema sino que además, permite tener una orientación sobre el empuje resultante de un UAV con un rotor inoperativo.

Según la configuración de la estructura, los hexacópteros presentan distintos tipos de controlabilidad. Durante una avería, aquellas configuraciones con rotaciones simétricas respecto el eje longitudinal del vehículo se mostrarán parcialmente controlables, mientras que las asimétricas y coaxiales seguirán siendo totalmente controlables. Para realizar un aterrizaje de emergencia con un hexacóptero parcialmente controlable se puede emplear la misma metodología expuesta para los cuadricópteros: renunciar al canal de control del *yaw* y modular únicamente el *roll* y el *pitch*.

Los octocópteros por su parte, son totalmente controlables hasta con un total de 2 rotores inoperativos. En el caso de que 3 rotores fallen a la vez, el vehículo se puede parcialmente controlar con la renuncia del canal de control del *yaw*. Según los rotores afectados y la configuración de la simetría respecto el eje longitudinal del rotor, un octocóptero puede llegar a ser parcialmente controlable con 4 o más rotores inoperativos. Aún así, es importante mencionar que la probabilidad de que todos estos rotores presenten fallos en la misma operación es extremadamente baja.

Al igual que los cuadricópteros, los hexacópteros y los octocópteros necesitan poder compensar el empuje que generaba el rotor averiado. Por lo tanto, si se quiere tener en cuenta un posibles fallo de rotor en una operación de transporte de mercancías, el empuje mínimo de cada uno de ellos se verá incrementado en función de la compensación que precisen los rotores funcionales en la configuración específica de cada vehículo. Además, el empuje máximo total generado por un UAV con un rotor menos también se verá afectado. En la *Figura 12* se muestra como queda reducido dicho empuje después de un fallo de rotor para algunas de las configuraciones más habituales para hexacópteros y octocópteros.

System configuration	Thrust in failure situation
Triangle hex	50 %
Hexagon hex	66 %
V-Shape octo	62 %
Octagon octo	70-73 %

Figura 12. Empuje de un UAV con fallo de rotor según su configuración.

Fuente: Desing of a Multi Rotor MAV with regard to Efficiency, Dynamics and Redundancy [49].

Teniendo en cuenta todo lo presentado en este apartado, se puede identificar que clase de estructura es la más adecuada para los vehículos destinados a las operaciones b2b y b2c que se pretenden implementar mediante la arquitectura que se desarrolla en este proyecto.

Como se ha expuesto durante el estudio de los b2b, uno de los factores más decisivos para las operaciones de este tipo de negocio es la masa máxima que el UAV puede transportar. Por dicha razón, para este tipo de operaciones, se descartan los vehículos con estructuras de menos de 6 rotores. Además, como los b2b realizarán mayoritariamente operaciones alejadas de zonas urbanas y tendrán la posibilidad de controlar gran parte del espacio terrestre pertinente, el volumen del UAV no se considera una limitación importante para las operaciones de dichos negocios y, por lo tanto, las configuraciones coaxiales no serán necesarias si no se considera oportuno. Por todo esto, según la masa máxima que se desea transportar y la respuesta que se pretenda que tenga el vehículo en caso de fallo de motor, de todas las presentadas hasta ahora, las estructuras más recomendables para los b2b son las octogonales “+” y “x” y las hexagonales “+” y “x” con rotaciones asimétricas respecto el eje longitudinal del vehículo.

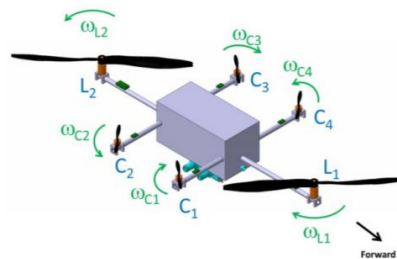
Obviamente, existen estructuras con más rotores que no se han tomado en consideración en este proyecto pero, si cumplen con las características expuestas en este apartado, pueden ser igual de válidas que las recomendadas anteriormente.

Por su parte, las necesidades de los b2c están directamente relacionadas con operaciones en zonas urbanas y, por lo tanto, el volumen del vehículo sí podría llegar a representar un factor limitante. Por esta razón, y por todas las consideraciones hechas durante este estudio, la estructura más recomendable para los UAVs destinados a este tipo de operaciones es la coaxial de 6 rotores. Esta configuración permite vehículos más compactos, con un empuje suficiente como para cubrir una gran mayoría de las operaciones [50] y, al ser totalmente controlable durante un fallo de rotor, presenta una seguridad operacional aceptable.

Al tratarse de un UAV coaxial, se deberá de tener en cuenta que diversas alteraciones deberán realizarse respecto su modelo equivalente de rotores separados para, de esta forma, mitigar la pérdida de eficiencia derivada de la interacción aerodinámica que causan dos rotores instalados en un mismo brazo. Además, el ruido producido por un rotor coaxial es significativamente mayor que el ocasionado por su equivalente de rotores separados [51].

Considerando las restricciones acústicas de las autoridades competentes mencionadas anteriormente, las alteraciones pertinentes tendrán también de ser capaces de mitigar el sonido producido. Si no se mitigan correctamente ni eficiencia ni el ruido, los rotores coaxiales podrían resultar no ser los más indicados para realizar las operaciones de los b2c, y consecuentemente, se perderían las beneficiosas ventajas que se han expuesto sobre la mejora del ratio entre empuje y volumen.

Como apunte final, es importante mencionar, que en el caso que las mitigaciones citadas en el párrafo anterior no puedan llevarse a cabo con el éxito suficiente como para que los UAVs coaxiales sean los indicados para sobrevolar zonas urbanas, se podría estudiar la posibilidad de emplear configuraciones compuestas, las cuales consisten en equipar a los UAVs con rotores de diferentes diámetros. Al disponer de rotores individuales, la correcta implementación de dichas configuraciones, presenta una mejor eficiencia a la vez que una reducción del ruido generado. Sin embargo, y aunque esta configuración es capaz de aumentar el ratio empuje-volumen, el tamaño que presenta es considerablemente mayor que el de los vehículos coaxiales. En la *Figura 13* se muestra una configuración compuesta de 6 rotores que podría presentarse como alternativa al hexacóptero coaxial en el caso que éste finalmente no se pudiera emprar en las operaciones b2c.



*Figura 13. Diseño de un UAV de 6 rotores con configuración compuesta.*

*Fuente: The Design and Construction of a High Endurance Hexacopter suited for Narrow Corridors\* [52].*

### 3.2. FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Tal y como se muestra en la Ecuación (3.6.) la potencia suministrada al sistema de propulsión de un UAV es proporcional al empuje que éste genera, y por lo tanto, a la carga máxima que el vehículo puede transportar. Además, el tiempo en que la fuente de alimentación puede suministrar dicha potencia determina la durada máxima de una operación llevada a cabo por un UAV. Como la carga y la durada máxima de las operaciones son factores que afectan directamente al funcionamiento y al diseño de una arquitectura de transporte de mercancías mediante UAS, en este apartado se analiza las diferentes fuentes de alimentación que existen y las características que éstas presentan.



Según la forma en que se genera la potencia que alimenta a los rotores existen cinco clases distintas de UAVs: los que usan energía solar, los que usan combustibles fósiles, los que están equipados con baterías eléctricas, los que están equipados con pilas de combustible y los híbridos.

Debido a su eficiencia y a su fiabilidad, así como al bajo nivel de coste, ruido, temperatura y vibraciones que presentan, las baterías eléctricas se han convertido en la fuente de alimentación más usada y comercializada entre los UAVs. Actualmente estas baterías pueden tener distintas composiciones, las más usuales son: níquel-metal hidruro, níquel-cadmio, cinc-aire, litio-aire, litioferrofosfato, litio-sulfuro y polímero de litio (LiPo); siendo éstas últimas las más populares. Cada tipo de composición ofrece diferentes propiedades y, como se puede apreciar en la *Figura 14*, las LiPo poseen claramente unas mejores prestaciones debido sobretodo a su alta potencia específica. Por este motivo, de ahora en adelante, las observaciones que se realicen en este apartado van a centrarse en esta clase de baterías.

	Ni-Cd (Nickel-Cadmium)	Ni-Mh (Nickel Metal Hydride)	LiPo (Lithium Polymer)	Li-S (Lithium-Sulphur)
Specific energy (Wh/kg)	40	80	180	350
Energy density (Wh/L)	100	300	300	350
Specific power (W/kg)	300	900	2800	600

*Figura 14. Comparación entre la composición de distintas baterías eléctricas Fuente: Converting a Fixed-Wing Internal Combustion Engine RPAS into an Electric Lithium-Ion Battery-Driven RPAS [53].*

La energía específica representa la relación entre la capacidad de una batería y su peso, o en otras palabras, la potencia que puede librar la batería de forma constante durante una hora por cada kilo de su propio peso. Este ratio es muy valioso para los vehículos tan sensibles al peso como los UAVs de transporte de mercancías, ya que a medida que la masa de su batería aumenta, la capacidad que ésta debe presentar también lo hace. Teniendo en cuenta, tal como muestra la *Figura 15*, que existe una relación lineal creciente entre el peso de una batería y la capacidad que proporciona y que independientemente de su composición, todas las baterías eléctricas ofrecen una energía específica relativamente baja (del orden de centenares de Wh/kg), al final, por mucho que se mejore la capacidad no va a aumentar el tiempo de vuelo del UAV. Este comportamiento exponencial invertido se puede apreciar en la *Figura 16*, donde se muestra como varía la duración de un vuelo multirrotor con un peso determinado y a una velocidad determinada a medida que aumenta la capacidad de su batería.

La problemática expuesta en el párrafo anterior limita de forma drástica una arquitectura de transporte de mercancías mediante UAVs propulsados por baterías eléctricas, ya que esta fuente de alimentación restringe la duración máxima de las rutas y, en consecuencia, el rango de distancia al que un solo vehículo puede dar servicio de forma directa y sin realizar ninguna parada. Para poder determinar el efecto de este límite se presenta en la *Figura 17* y *Figura 18* como se ve afectada la duración máxima que ofrece una batería en función de la velocidad de avance del UAV, la carga que transporta y su coeficiente de drag.

Este proyecto ha decidido tomar en consideración estos 3 parámetros ya que si se aplica la Ecuación (3.1.) para representar el movimiento horizontal de un UAV se puede apreciar como justamente el aumento de la velocidad provoca un aumento de la potencia requerida y como el hecho de transportar mercancías influye a la  $m$  y a la  $f_D$ .

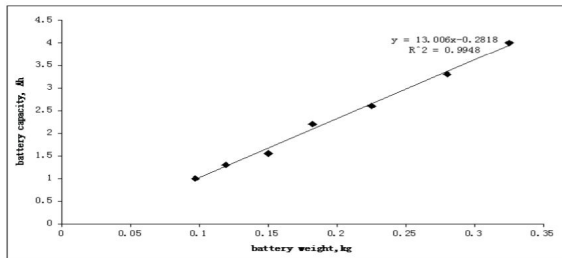


Figura 15. Relación entre la capacidad de una batería pequeña y su peso.

Fuente: *Improving Electric Powered UAV's Endurance Incorporating Battery Dumping Concept* [54].

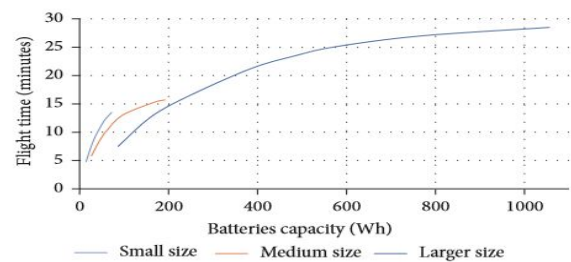


Figura 16. Tiempo de vuelo vs. Capacidad para operaciones con baterías eléctricas.

Fuente: *Development of Dual Power by Multirotor System* [55].

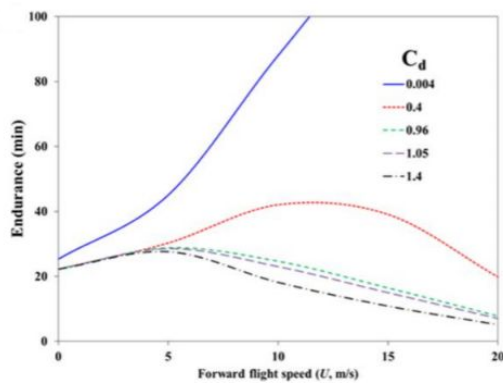


Figura 17. Durada de la batería vs. Velocidad en función del  $C_d$ .

Fuente: *Practical Endurance Estimation for Minimizing Energy Consumption of Multirotor Unmanned Aerial Vehicles* [56].

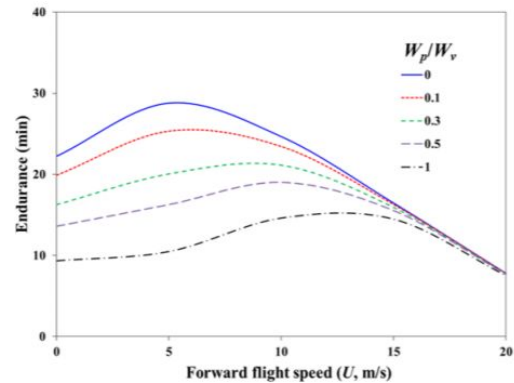


Figura 18. Durada de la batería vs. Velocidad en función del peso de la carga.

A través de estas figuras, y como se suponía al presentar la Ecuación (3.1.), se puede concluir que contra más rápido se pretenda realizar una operación, más aumenta la potencia que se requiere para llevarla a cabo y en consecuencia, menor es la ventana de tiempo en la que el UAV puede operar.

En la *Figura 17* se puede valorar el efecto negativo del coeficiente de *drag*. Dado que se supone que el vehículo ya ha estado diseñado para reducir al máximo este valor, si se desea poder realizar rutas de mayor duración, se debe de procurar que la carga que se transporta no afecte en exceso a la aerodinámica del UAV. Por ello, es recomendable que dicha mercancía se traslade en carcasas de materiales resistentes pero ligeros. De esta manera se puede modelar el coeficiente exacto que tendrá el vehículo y no dejar las limitaciones que produce el comportamiento de las baterías a merced de la carga que se transporta en cada operación.



Además, si todos los vehículos de una flota están equipados para transportar cualquier mercancía independientemente del coeficiente de *drag* que ésta genere, se mejora la eficiencia de dicha flota frente a las posibles demandas. Por todo esto, es recomendable añadir una carcasa para transportar la carga aunque esto comporte un efecto negativo en el peso total del vehículo. Únicamente en el caso que las operaciones sean rutinarias y trasladen siempre las mismas mercancías, tal y como puede suceder en algunos b2b, se podría obviar dicha consideración y rechazar así los beneficios que supone para el tiempo de vuelo la modelización del coeficiente de *drag* de la carga que se desea transportar.

Tanto la *Figura 17* como la *Figura 18* muestran los valores de un UAV de categoría 3 de 6 rotores y con configuración “x”. Es decir, una de las opciones recomendadas en el apartado anterior para realizar entregas b2b. El coeficiente de drag se ha estipulado en un probable 0,96 y el peso sin las baterías ni carga en 10kg. Teniendo en cuenta que el error medio del método empleado para calcular dichas figuras es del 2,3% y que por lo tanto tan solo puede haber una afectación de segundos, los valores que presentan pueden considerarse fiables para la campaña que pretende este proyecto en relación a los b2b.

Para tener un idea más concisa del rango de valores que se está mostrando, si se toman entre 2 y 4 baterías LiPo a un voltaje de 49V y con una capacidad de entre 16Ah y 32Ah, la durada máxima de las operaciones sin tener en cuenta el peso de las mercancías fluctúa entre 24 y 33 minutos a una velocidad de 12m/s. Esta durada se ve reducida en función del peso de la carga siguiendo el comportamiento mostrado en la *Figura 18*. Por su parte, para los UAVs coaxiales destinados a las operaciones b2c estos valores pueden variar y en algunos casos incluso disminuir. Al poseer una estructura más compacta el Cd disminuye, pero debido a la pérdida de eficiencia derivada de la influencia aerodinámica que ejercen los rotores de un mismo brazo entre ellos, la potencia requerida para realizar la misma operación aumenta y, en consecuencia, la durada máxima y/o la velocidad que ofrecen estos vehículos se puede ver perjudicada.

Más allá de la duración que puedan tener las rutas de la arquitectura, otro factor importante a la hora de considerar las baterías eléctricas como fuente de alimentación de los UAVs es la degradación funcional que éstas pueden sufrir. Esta degradación es conocida como estado de salud (SOH) y se mide con el tanto por ciento de la capacidad que presenta en un momento dado una batería respecto su comportamiento de fábrica. El tiempo de antigüedad, el método de empleo, los ciclos realizados y la temperatura media de exposición son los principales responsables de dicha degradación [57] [58].

Considerando las necesidades de los usuarios de un arquitectura de transporte de mercancías mediante UAS, el método de empleo para las baterías eléctricas de los UAVs se prevé perjudicial para su SOH.

Debido a la necesidad de reducir el tiempo de espera desde que se realiza un pedido hasta que éste llega a su ubicación final, es más que probable que se intente que el tiempo de vuelo sea menor a 30 minutos, lo que provoca ratios de descarga mínimos de 2C. Para reducir este tiempo de espera, también es necesario que las baterías se encuentren cargadas a su máximo previamente a que se realice ningún pedido, cosa que aumenta su estado de carga medio ( $SOC_{AV}$ ). Además, con el objetivo de acrecentar la velocidad de los vehículos se fuerza las baterías hasta que éstas se queden descargadas a su mínimo y, consecuentemente, se aumenta también su rango de estado de carga (*swing-range*).

Tanto los rápidos ratios de descarga como el aumento del  $SOC_{AV}$  y del *swing-range* son comportamientos nocivos para el SOH de una batería eléctrica. Teniendo en cuenta estos métodos perjudiciales de empleo y que el SOH mínimo aceptado por convención es del 80%, si los precios de la electricidad o de las baterías LiPo no varían, se calcula que el 60% de los gastos totales de la alimentación de los UAVs destinados a transportar mercancías serán causados por la compra de nuevas baterías [58]. Sin embargo, alargar la vida útil de las baterías eléctricas no solamente significa reducir de forma significativa los gastos a largo plazo del transporte de mercancías mediante UAS, sino que también promueve un uso responsable de la energía y aporta una mejora a la huella medioambiental de la arquitectura.

Una de las estrategias posibles para mejorar el SOH es disponer de la posibilidad de conectar y desconectar las baterías del vehículo para que los UAVs no trabajen siempre con la misma fuente de alimentación. De esta forma se puede crear una organización eficiente en la que un conjunto de baterías con características diferentes presta el mejor método de empleo posible para una flota destinada a realizar unas operaciones específicas. Para llevar esta organización a cabo se deben optimizar dos labores distintas: la primera recae en la asignación de las baterías y la segunda en la planificación de los tiempos relacionados con la carga y descarga de cada una de ellas. La labor de asignación consiste en determinar cuál de las baterías disponibles en el conjunto debe equiparse a cada vehículo según la capacidad que requieren las operaciones que se pretenden realizar. De esta forma se evita que los UAVs carguen con peso innecesario por parte de las baterías reduciendo el consumo de energía y mejorando el SOH global de todo el conjunto. Por su parte, la labor de planificación determina el momento y la duración de la carga y descarga de las baterías y, de esta forma, se reduce el  $SOC_{AV}$  de cada una de ellas.

Además, como el tiempo que tardan las baterías en cargarse es relativamente alto comparado con la duración prevista de las rutas, existe la posibilidad de que en algún momento los vehículos estén listos para realizar una operación pero deban esperar que la batería que tienen asignada se termine de cargar. Por este motivo, una correcta optimización de la labor de planificación debe también minimizar los tiempos de espera en que los UAVs se encuentran en tierra. De esta forma, se pretende reducir los retrasos y los efectos negativos del tiempo de carga en la eficiencia y los beneficios del transporte de mercancías mediante UAS.

Con el objetivo de organizar y optimizar las labores de asignación y planificación descritas hasta ahora, se adjunta en el [Anexo 2](#) la descripción de los parámetros que se deben de tomar en consideración, los límites físicos de cada labor, los modelos matemáticos recomendados para computar la optimización y la reducción de costes y tiempos de espera estimados para este tipo de organización.

Sin embargo, para que esta estrategia de optimización sea verdaderamente eficaz y los beneficios teóricos presentados sean concordes con la realidad, se debe de procurar que toda la preparación previa al despegue del UAV sea lo más rápida posible. Una forma de agilizar dicha preparación es automatizando los procesos y reduciendo al máximo posible la influencia directa humana. Justamente por eso, actualmente ya se están desarrollando distintos modelos de sistemas que son capaces de intercambiar baterías de un UAV de forma autónoma y en menos de un minuto [59] [60]. Si a la larga se perfeccionan, estos sistemas pueden funcionar como punto intermedio de una ruta que precise una velocidad o un tiempo de vuelo mayor a la que la capacidad total de las baterías a bordo del vehículo pueden ofrecer.

Otra estrategia desarrollada con el objetivo de mejorar el comportamiento de las baterías eléctricas, aumentar la durada de los vuelos y reducir la complejidad de su organización, es la utilización de los rayos láser [61]. Esta tecnología consiste en transferir energía lumínica al UAV desde una estación emisora y, mediante receptores fotovoltaicos instalados en los propios vehículos, transformar dicha energía en electricidad para cargar las baterías sin necesidad de descender a nivel de suelo. Esta estrategia es extremadamente sensible a la localización de la estación base que controla el vehículo respecto la estación emisora del láser ya que, las trayectorias de las operaciones que utilicen esta tecnología deben de maximizar simultáneamente su posición respecto a las dos estaciones [62]. En muchos casos esto resultaría inviable con realizar la ruta más óptima entre el origen y el destino de una mercadería y, consecuentemente, se disminuiría la principal razón por la que las empresas recurrirían a un sistema UAS de transporte: la rapidez. Además, esta estrategia significaría un aumento del coste total del sistema, ya que no sólo se acrecienta el coste de las instalaciones en tierra sino que, al no realizar la ruta más óptima y al haber de emitir un láser de centenares de vatios para recargar las baterías [63], el coste de la potencia requerida por operación también aumenta significativamente. Si por todo lo presentado esta tecnología es poco recomendable para los b2b aún lo es menos para los b2c, ya que en las zonas urbanas existe una elevada posibilidad de obstrucción física entre el láser y el vehículo.

Debido a los motivos expuestos en este apartado, para mejorar las prestaciones de las baterías eléctricas, resulta más eficiente una estrategia de baterías conectables y desconectables con una correcta optimización de las labores de asignación y planificación que una estrategia de carga *wireless* mediante rayos láseres.

Sin embargo, la tecnología que ofrece esta última estrategia puede resultar útil en una arquitectura de transporte de mercancías mediante UAS si se reconvierte en un recurso de emergencia. Si se equipan los puntos de destino de las operaciones para tener la posibilidad de cargar a distancia las baterías de los UAVs en la última fase de los planes de vuelo, se pueden mitigar el peligro que suponen los aterrizajes de emergencia de aquellos vehículos que, por culpa de haber sufrido alguna avería o contratiempo en su ruta, presentan en la fase final de la operación un déficit de suministro de potencia por parte de la fuente en energía.

Debido a los problemas derivados de la baja energía específica y de la complicada organización que presentan las baterías eléctricas, se han desarrollado sistemas de propulsión para los UAVs funcionales con distintas fuentes de energía. Uno de estos sistemas de propulsión es el actualmente utilizado por la aviación convencional, es decir, los motores de combustión interna alimentados por hidrocarburos (ICE). Este tipo de sistemas presentan una mayor figura de ruido y temperatura, una peor eficiencia y fiabilidad y, debido al uso de combustibles, un aumento de las emisiones de efecto invernadero [49] [63]. Además, la necesidad de distribuir la potencia a múltiples puntos de propulsión acrecienta el número de partes móviles dentro del UAV, cosa que conlleva un mayor número de revisiones y tareas de mantenimiento. Sin embargo, los hidrocarburos empleados como combustibles son aproximadamente 50 veces más energéticamente densos que las baterías LiPo analizadas previamente y, a diferencia de éstas, el peso del vehículo disminuye a medida que se va consumiendo la potencia que proporcionan [64]. Por ese motivo, aún con todos los inconvenientes presentados, el uso de los carburantes puede resultar beneficioso si se pretende aumentar la duración del vuelo, la velocidad o el peso de la carga a transportar.

Con el objetivo de no tener que escoger íntegramente entre los inconvenientes y beneficios previamente mencionados de los carburantes, se ha desarrollado una tecnología híbrida que permite aumentar la potencia suministrada a la vez que, en comparación a un sistema únicamente ICE, se mejora la eficiencia y se reduce el consumo de combustible, las emisiones generadas y el ruido del sistema [65] [66]. Este híbrido permite al rotor alimentarse de la combustión al mismo tiempo que recarga las baterías. Dichas baterías podrán usarse cuando se necesiten operaciones más silenciosas o cuando se precisa suplir parte de la potencia requerida para que el ICE trabaje en su rango más eficiente.

Tres configuraciones pueden emplearse para desarrollar los sistemas de propulsión híbridos: La configuración en serie, la configuración en paralelo y la configuración serie-paralelo. En la configuración en serie la energía mecánica generada por el ICE es convertida en eléctrica mediante un generador y se puede utilizar para alimentar directamente al motor eléctrico o para recargar las baterías. Las hélices de esta configuración son alimentadas únicamente por un motor eléctrico, el cual puede ser activado directamente por el generador o por las baterías. La configuración en serie permite generar potencia a través del motor eléctrico, del ICE o de ambos a la vez.

Además, como el ICE no está conectado directamente a las hélices éste puede trabajar siempre en su rango óptimo. Sin embargo, el tamaño requerido de las baterías y el hecho de precisar de un generador, incrementa notablemente el peso del vehículo. La estimación realizada por Harmon [67] indica que para un UAV de 13,6 Kg la configuración en serie resulta aproximadamente un 8% más pesada que la configuración en paralelo

La configuración en paralelo permite al ICE recargar las baterías y/o alimentar directamente a las hélices a través de un acoplamiento mecánico. Este acoplamiento a la vez se encuentra conectado a un motor eléctrico alimentado por baterías. Al igual que la configuración en serie, el híbrido en paralelo permite generar potencia por el ICE, por el motor eléctrico o por ambos, siendo esta última opción la más óptima [68]. Como ya se ha mencionado, aunque esta configuración precisa de un acoplador mecánico, resulta en general más ligera. Sin embargo, al tener el ICE directamente alimentado a las hélices es consecuentemente menos eficiente y, teniendo en cuenta que no es tan sencilla como su homóloga en serie, precisa de un sistema de control más sofisticado.

La configuración en paralelo permite al ICE recargar las baterías y/o alimentar directamente a las hélices a través de un acoplamiento mecánico. Este acoplamiento a la vez se encuentra conectado a un motor eléctrico alimentado por baterías. Al igual que la configuración en serie, el híbrido en paralelo permite generar potencia por el ICE, por el motor eléctrico o por ambos, siendo esta última opción la más óptima [68]. Como ya se ha mencionado, aunque esta configuración precisa de un acoplador mecánico, resulta en general más ligera. Sin embargo, al tener el ICE directamente alimentado a las hélices es consecuentemente menos eficiente y, teniendo en cuenta que no es tan sencilla como su homóloga en serie, precisa de un sistema de control más sofisticado.

La configuración en paralelo permite al ICE recargar las baterías y/o alimentar directamente a las hélices a través de un acoplamiento mecánico. Este acoplamiento a la vez se encuentra conectado a un motor eléctrico alimentado por baterías. Al igual que la configuración en serie, el híbrido en paralelo permite generar potencia por el ICE, por el motor eléctrico o por ambos, siendo esta última opción la más óptima [68]. Como ya se ha mencionado, aunque esta configuración precisa de un acoplador mecánico, resulta en general más ligera. Sin embargo, al tener el ICE directamente alimentado a las hélices es consecuentemente menos eficiente y, teniendo en cuenta que no es tan sencilla como su homóloga en serie, precisa de un sistema de control más sofisticado.

Para poder tomar en consideración los UAVs híbridos en la arquitectura que se pretende desarrollar y para comparar sus prestaciones con los vehículos alimentados únicamente por baterías eléctricas, se presenta en la *Figura 19* la durada de vuelo máxima de un hexacóptero sin carga y de características similares al de la *Figura 17* y *Figura 18*.

<i>Battery capacity (Ah)</i>	<i>Battery mass (kg)</i>	<i>Stored fuel (kg)</i>	<i>Endurance (min)</i>
8	1.19	2.21	69.1
10	1.39	2.02	70.2
12	1.58	1.83	68.7
16	1.98	1.42	59.8

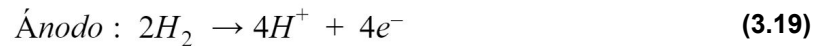
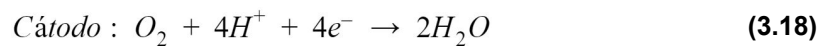
Figura 19. Durada de vuelo de un hexacóptero híbrido con diferentes baterías.

Fuente: Design and performance evaluation of a hybrid electric power system for multicopters [69].

Según algunos fabricantes, los valores teóricos mostrados en esta figura se podrían ver mejorados significativamente ya que, como muestran las especificaciones de algunos UAVs presentes en el mercado, los hexacópteros híbridos podrían llegar a ofrecer los mismos minutos de vuelo que los aquí presentados, pero con cargas de hasta 5Kg [70].

Otro tipo de vehículos híbridos que se deben sopesar por su posible uso en el transporte de mercancías son aquellos equipados con pilas combustibles. Las pilas de combustible (FC) son dispositivos que a través de una reacción química controlada son capaces de proporcionar energía eléctrica. Dicha energía se genera sin la necesidad de implementar ningún proceso adicional térmico o mecánico por lo que se consigue alcanzar eficiencias mayores en comparación a aquellas fuentes de energía que si los precisan. Algunas de las FC más populares, diferenciadas según el ánodo y cátodo empleados en su reacción, son: las FC alcalinas (AFC), las de directo-metanol (DMFC), las de ácido fosfórico (PAFC), las de carbonato fundido (MCFC), las de membrana de intercambio de protones (PEM) y las de óxido sólido (SOFC).

Las PEM utilizan hidrógeno y oxígeno como combustible aunque, como el oxígeno se encuentra presente de forma natural en la atmósfera, únicamente se debe de suministrar hidrógeno en la FC. Si se toma la reacción representada en la Ecuación (20) por la cual estas pilas generan electricidad, se puede observar como el producto final resultante es agua y, por lo tanto, como las PEM generan 0 emisiones de gases de efecto invernadero.



Si se tiene en consideración que las PEM presentan una mayor eficiencia que las PAFC y las MCFC [71], que en comparación a las AFC trabajan a un rango de temperaturas más adecuado para generar electricidad a un UAV [72] y que presentan un menor peso y una mayor densidad energética que las SOFC y las DMFC [65], se puede justificar que a fecha de este trabajo son las FC más indicadas para operar como fuente de alimentación de un UAV multirrotor.

Sin embargo, la potencia específica de las PEM se estipula como máximo en 500W/Kg [73], lo que es significativamente inferior a la potencia específica ofrecida por las baterías eléctricas. Por este motivo, las FC no se emplean como fuente única de alimentación y habitualmente se utilizan acompañadas de baterías eléctricas. En este híbrido la potencia necesaria se comparte entre la PEM y las baterías, permitiendo a esta primera trabajar en un estado constante de máximo rendimiento y evitando una posible caída de la potencia suministrada por parte de la FC cuando hay cambios bruscos en la potencia requerida [74]. Además, en los estados que sea posible, la PEM puede recargar las baterías proporcionando un incremento de la duración del vuelo. El híbrido PEM-baterías es un sistema silencioso, eficiente, de rápida respuesta y respetuoso con el medio ambiente. A la vez, es capaz de presentar un aumento de la energía específica respecto el uso único de baterías y un aumento de la potencia específica en comparación al uso único de las PEM. Por contrapartida, se debe de tener en cuenta que al igual que los híbridos que incluyen ICEs, al tener que añadir una segunda fuente de alimentación se incrementa el peso y el volumen del UAV así como la complejidad de los sistemas de control necesarios. A continuación se muestra de forma esquemática el funcionamiento interno de una PEM y de un híbrido PEM-batería.

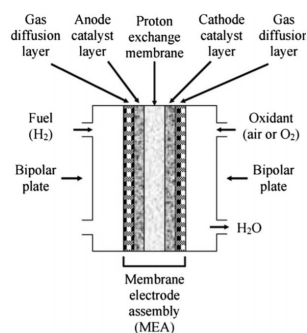


Figura 20: Diseño interno de una PEM de hidrógeno.

Fuente: Fuel cell systems analysed in Fuel Cell Systems Explained [75].

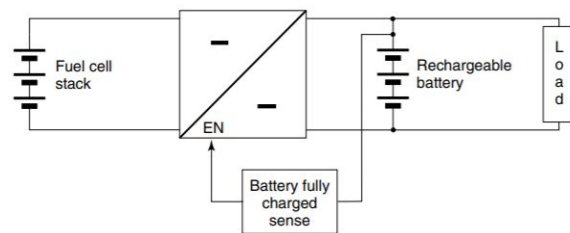


Figura 21: Diseño interno de un sistema híbrido PEM-Batería Eléctrica.

Fuente: Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles [76].

Otra fuente de alimentación factible para los UAVs es la solar. Esta fuente de alimentación consiste en equipar a los vehículos con celdas fotovoltaicas (PV) y con baterías eléctricas. Las PV proporcionan de forma continua energía a los rotores de los UAV, ya que son capaces de transformar la radiación solar en corriente eléctrica. Cuando la operación lo permite esta corriente se destina a recargar las baterías eléctricas, que son utilizadas como sistema de almacenaje y de soporte cuando la potencia requerida es mayor a la que las PV pueden suministrar.

Aunque actualmente se están desarrollando distintas PV ligeras y con prestaciones aplicables para la industria de la aviación como por ejemplo las celdas cristalinas de silicio o las celdas de arseniuro de galio [77], y aún estando demostrado que en comparación al uso único de baterías los sistemas de PV-baterías acrecientan la durada máxima de vuelo disponible para algunos UAVs [63], esta fuente de alimentación presenta de forma intrínseca dos limitaciones que la hace inviable a día de hoy para los vehículos destinados al transporte de mercancías. La primera limitación es la relación creciente entre la área de la PV y la energía que ésta genera, ya que teniendo en cuenta los UAVs rotatorios escogidos como óptimos para operar en la arquitectura que pretende este proyecto no se dispone de espacio físico en el vehículo donde extender la superficie necesaria para que las PVs puedan captar la radiación solar que precisan. La segunda limitación viene dada por la fuerte dependencia de las PVs a la climatología y al bajo nivel de contaminación aérea. Si se pretende ofrecer una arquitectura fiable que pueda ser utilizada el mayor espacio de tiempo posible, se debe reducir el máximo las situaciones en las que el servicio no esté disponible y, por lo tanto, no se puede depender de un hecho tan habitual como la falta de sol o la polución en un ambiente industrial o urbano.

En este apartado se han presentado las fuentes de alimentación más adecuadas para una arquitectura de transporte de mercancías mediante UAS. Como se ha podido apreciar, todas ellas ofrecen distintas prestaciones en cuanto a eficiencia, coste, emisiones, durada de vuelo y potencia generada. Con el fin de que cada empresa pueda emprar aquella que considera más conveniente, dicha arquitectura debe de poder ofrecer la posibilidad de operar con cualquiera de ellas. Justamente por eso, se debe de crear una organización que pueda dar cabida a los UAVs que utilicen la fuente de alimentación más limitante (baterías eléctricas) a la vez que no se perjudica en eficiencia o tiempo a aquellos alimentados por fuentes con una mayor energía específica (híbridos ICE-baterías y híbridos PEM-baterías). Además, como se ha demostrado, las mejores fuentes de alimentación incorporan aunque sea a nivel suplementario el uso de baterías eléctricas y, por lo tanto, el análisis del SOH y la optimización de las labores de asignación y de planificación que se han planteado anteriormente resultan de una importante relevancia para la eficiencia, la reducción de costes y la sostenibilidad total de la arquitectura. También se ha mostrado la influencia que tiene la forma de la mercancía en relación al coeficiente de *drag* y, en consecuencia, a la potencia requerida por la operación. Por último, se debe remarcar la propuesta realizada para que los sistemas de recarga de batería *wireless*, como los rayos láser, se implementen como un sistema de emergencia para evitar aterrizajes forzosos o peligrosos en un futuro. Aunque, obviamente, más recerca y estudios deben efectuarse en este ámbito.

Para terminar, también se debe de tener en cuenta que las tecnologías relacionadas con las fuentes de alimentación de los UAVs mejoran año a año [65] y, por lo tanto, la arquitectura presentada debe ser adaptable para estar a la vanguardia de los nuevos avances y de las nuevas fuentes de alimentación que se desarrollen al día de mañana.



## CAPÍTULO 4. ARQUITECTURA

### 4.1. CONTROL OPERACIONAL

El primer elemento analizado para determinar cómo debe ser una arquitectura de transporte de mercancías mediante UAS es el modelo empleado para que los UAVs realicen de la forma más segura posible el plan de vuelo que se les ha sido asignado.

Para llevar a cabo una operación, los UAVs recogen información de los sensores y de las unidades de control a bordo del vehículo y la procesan a través de un software o de una unidad de adquisición de datos. Esta información es relevante para monitorizar el estado en el que se encuentra la operación y para determinar qué decisiones se precisan tomar con el fin de realizar la ruta establecida de forma satisfactoria, segura y eficiente. Dichas decisiones pueden determinarse mediante un software integrado en el mismo vehículo o con una CPU externa instalada en una estación terrestre (GS) y capaz de comunicarse con el UAV mediante un *wireless data-link*. La posibilidad de tomar las decisiones desde dos puntos distintos conlleva tener que escoger qué grado de centralización se quiere implementar en la arquitectura que se desea desarrollar. Es decir, qué decisiones se deben descentralizar para que se lleven a cabo desde los propios vehículos y qué decisiones se deben centralizar a una única GS capaz de conectarse a la vez con toda una flota.

Descentralizar por completo una flota de UAVs puede presentar ventajas como la reducción de la latencia en la toma de decisiones o la disminución del peso, el coste y la complejidad de las infraestructuras derivada de un sistema de comunicaciones. Sin embargo, es poco aconsejable ya que impide la intervención humana en la operación y la revisión de datos por otras fuentes que no sean las propias del vehículo. Además, para que un UAV totalmente descentralizado pudiera cumplir con las medidas de seguridad requeridas por la legalidad y analizar por sí solo todas las variables que determinan las decisiones que se deben tomar durante un vuelo, se debería de aumentar el número de sensores de abordo, equipar al vehículo con una CPU potente y hacer asimismo todo el sistema redundante. Con lo que consecuentemente se acrecentaría de forma negativa la potencia requerida por la operación y el peso del vehículo, contrarrestando los beneficios de peso, coste y simplicidad que se intuyen a primera vista al eliminar el sistema de comunicaciones con la GS.

Por su parte, centralizar la información de todos los UAVs operativos en una GS permite a fuentes externas como softwares de control o pilotos intervenir en la operación mientras esta se está realizando. Además, como la GS recibe los datos de los UAVs activos tiene una visión global de la operativa y, por lo tanto, puede detectar posibles conflictos antes que sucedan y evitarlos mediante cambios de ruta (*rerouting*).

Centralizar el procesamiento de datos implica también una ventaja cuando se desea implementar una actualización o una modificación en los códigos de control, ya que es más sencillo actualizar un único elemento que todos los vehículos por separado. Sin embargo, el hecho de tener un punto donde toda la información confluye significa también disminuir la robustez, ya que si la GS falla todo el sistema falla. En cambio, cuando se descentraliza la toma de decisiones, si la CPU de un vehículo falla aquella operativa que no se vea afectada puede seguir trabajando con normalidad. Para que una única GS pueda recibir los datos de distintos vehículos a la vez se debe tener en cuenta que previamente se necesita una estandarización de los protocolos por los cuales se transmite la información y una garantía que el sistema receptor es capaz de asimilar todas las señales con un ratio de pérdida de paquetes aceptable.

A día de hoy, la solución más sencilla para realizar una entrega mediante UAVs es que las operaciones se lleven a cabo con pilotos remotos controlados por humanos y establecer por cada una de ellas una GS individual. De esta forma se permite al piloto controlar casi todos los aspectos de la operación desde tierra y adaptar la GS a las necesidades de un único plan de vuelo.

Sin embargo, esta estrategia es solamente eficiente para empresas con un bajo nivel de entregas, con rutas repetitivas y con la posibilidad de disponer de un amplio terreno debajo del volumen operacional para poder situar en el lugar más conveniente las distintas GS. Por lo tanto, esta forma de realizar la operativa es solamente viable para b2b situadas lejos de zonas urbanas y que requieran pocas entregas diarias. Cuando el número de operaciones aumenta o se precisa de entregas simultáneas los costes de tener pilotos y GS para cada una de ellas aumenta, así como la complejidad organizativa de la localización y de las prestaciones de las GS. Justamente por eso, si la demanda de entregas mediante UAVs cumple con los beneficios presentados en el Capítulo 1 y finalmente terminan por popularizarse, la forma más eficiente de organizar la operativa es con vuelos autónomos centralizados al mínimo número posible de GS. La parte autónoma del vuelo implica una descentralización de la navegabilidad y de los sistemas aviónicos, mientras que la parte centralizada permite la revisión, el control y la intervención humana en la operación.

Descentralizar la navegabilidad implica programar el UAV para poder autogestionar la estabilidad del vuelo, la potencia suministrada a cada motor, la posición y orientación de cada rotor, así como la ubicación en la que se encuentra el vehículo, la siguiente ubicación en la que se debe encontrar, la velocidad a la que viaja y la siguiente velocidad que debe alcanzar. De esta forma se pretende que el UAV desempeñe de forma autónoma una ruta predefinida, el seguimiento de ésta, el despegue, el aterrizaje y las maniobras de *hovering* que se precisen. Esta descentralización de la navegabilidad ha estado extensamente estudiada y actualmente es ya realizable mediante la instalación de un piloto automático [78] [79]. Como es de esperar, cada piloto automático presenta distintas características según su fabricante.

Aún así, para el funcionamiento que se pretende que den en este proyecto, a parte de garantizar un error aceptado entre el posicionamiento de la ruta programada y el actual, los pilotos automáticos deben de poder minimizar las perturbaciones de acoplamiento cruzado entre los *loops* del control de vuelo longitudinal y lateral y los *loops* del control de vuelo vertical. Además, deben de ser capaces de mitigar alteraciones externas en la navegabilidad como las causadas por los vientos y de detectar e informar de posibles mal-funcionamientos en su propio sistema.

Las rutas programadas que ejecutan los pilotos automáticos son realizadas mediante un conjunto de *waypoints*, donde en cada uno de ellos el UAV debe realizar algún cambio en su sistema de navegabilidad. La forma más habitual que tienen los pilotos automáticos de interpretar la unión entre dichos waypoints es mediante una línea recta. Sin embargo, es fácilmente demostrable como las rutas reales ejecutadas por los UAVs suele presentar giros curvados por ejemplo, en el momento de rodear un obstáculo. Con el fin de que los planes de vuelo sean lo más precisos posibles, y mejorar así el cálculo del combustible o electricidad que se precisa para la operación y la fiabilidad en los tiempos de entrega de las mercancías, es importante implementar la posibilidad de que las uniones entre los waypoints no sean lineales. Por ello, en el [Anexo 3.1](#), se describe y presenta un posible un modelo matemático para considerar uniones no lineales entre *waypoints* que permite mejorar el coste y la eficiencia de las operaciones que se realicen en la arquitectura.

A parte de la estimación de un mejor plan de vuelo, si se pretende definir una arquitectura UAS que en un mismo espacio pueda dar cabida a múltiples operaciones y operadores, que interfiera lo mínimo posible con la aviación civil convencional y que se muestre segura en el caso que objetos no cooperativos se introduzcan en ella al haber descentralizado la navegabilidad, se debe también considerar una respuesta rápida delante de los posibles conflictos potenciales. Teniendo en cuenta la latencia de la respuesta y que los UAVs se pretende que operen de forma autónoma BVLOS, la mejor forma de resolver un conflicto resulta en implementar sistemas DAA al piloto automático a bordo del vehículo y descentralizar parcialmente la GS de esta tarea. Es importante matizar la importancia de la palabra “parcialmente” ya que una de las razones de no descentralizar del todo la arquitectura es tener la posibilidad que la GS realice un seguimiento de la operativa y puede intervenir en el caso que el piloto automático detecta un conflicto y/o necesite un *rerouting* por el fallo de algún sistema o por la modificación de una variable externa incontrolable para los sensores de abordó.

El sistema DAA es el encargo de evitar que el UAV colisione durante un vuelo. Para ello debe de proporcionar como mínimo las funcionalidades de vigilancia, seguimiento, alerta y orientación. “Vigilancia” de que se cumplen las distancias de seguridad establecidas por las autoridades competentes con otros elementos del espacio aéreo. “Seguimiento” de la ruta que se está operando para garantizar que se sigue con el plan de vuelo establecido y que no se invaden zonas no planificadas.

“Alerta” para poder informar a vehículos, operadores y autoridades de posibles riesgos en la operación y “orientación” para poder guiar de forma satisfactoria el UAV en caso de tener que realizar una maniobra de *avoidance* para evitar una posible colisión. Con el objetivo de poder disponer de dichas funcionalidades el sistema DAA del vehículo debe de tener en cuenta conflictos potenciales con los siguientes elementos: UAV cooperativos del mismo operador, UAV cooperativo de otro operador, vehículo de aviación civil tripulada, elemento no cooperativo, obstáculos físicos fijos, elevaciones del terreno y zonas climatológicas peligrosas.

Tanto si los UAVs cooperativos son del mismo operador como de otros operadores, la DAA debe trabajar de la misma manera para unificar las medidas de control de la arquitectura. Esto implica la creación e implementación de protocolos de comunicación estandarizados para que los vehículos realicen maniobras compenetradas y la definición previa de cómo deben ser dichas maniobras. Algo que a día de hoy, la comisión técnica de radio para la aeronáutica (RTCA) ya está desarrollando a través de la ya mencionada SC-228 [83], que presenta las actuaciones mínimas para sistemas UAS (MOPS) que serán de obligatorio cumplimiento para los sistemas DAA de los UAVs que operen en la arquitectura de transporte de mercancías. El sistema capaz de llevar a cabo la detección y solución de estos conflictos así como de garantizar una separación segura entre estos vehículos no está aún disponible a fecha de este trabajo, aunque se espera que próximamente lo esté a coste de instalar instrumentos como el FlightHorizon PILOT [84] y, por lo tanto, de aumentar el peso del UAV.

Los DAA para vehículos tripulados civiles requieren de una mayor intervención humana, ya que en el momento que el UAV entre en un espacio aéreo controlado precisa del despeje operacional por parte de la ATC pertinente. Las rutas para la entrega de mercancías no deberían interferir con las operaciones de dichos espacios, pero en el caso de que por alguna razón lo hicieran sería responsabilidad de las administraciones del UTM/U-Space ponerse en contacto con ATC y colaborar para solucionar la situación. Si dicha situación no se soluciona, para realizar una maniobra de *avoidance* los UAVs deben de presentar un sistema compatible con los *transponders* y ACAS utilizados en la aviación convencional. Nuevamente, las maniobras necesarias para la resolución del conflicto deberán homogeneizar y atenerse a aquellas presentadas en la SC-228.

Los conflictos con elementos no cooperativos resultan más complicados al no disponer de la información del objeto que se debe evitar ni de la posibilidad de establecer comunicaciones con éste para coordinar la operación. Un ejemplo de dichos elementos no cooperativos son las aeronaves tripuladas que operan bajo normas visuales (VFR), sin servicios de ATC y sin transmitir información vía *transponder* o *broadcast*. En este caso, los UAVs pueden estimar la posición y la información relativa al movimiento de estos elementos con radares *air-to-air* (AARSS).

Sin embargo, éstos presentan limitaciones severas a la hora de calcular la altitud y el ratio de ascenso del elemento no cooperativo y, consecuentemente, no son recomendables para ejecutar soluciones verticales aunque algunas veces éstas sean las más óptimas [85]. Una forma de mitigar esta deficiencia de los AARSS es implementar al UAV de una plataforma de múltiples sensores. A día de hoy aún no hay unanimidad en el grupo de sensores que debe formar parte de la plataforma, así que los presentados a continuación son solamente una recomendación para valorar las posibles combinaciones.

Para determinar el rango a un objeto puede resultar útil implementar sensores *laser imaging detection and ranging* (LIDAR) [86] o radares *millimetre wave* (MMW) [87]. Los primeros proporcionar medidas de distancia a través de la recepción de luz previamente emitida, mientras que los segundos trabajan con señales de una corta longitud de onda y además pueden proporcionar el ángulo relativo (*bearing*) respecto el objeto no cooperativo.

El cálculo del azimut y elevación de obstáculos no cooperativo puede realizarse a través de sistemas electro-opticals (EO) [88], sensores acústicos o sensores infrarrojos (IR) [89]. Los EO son sistemas compactos y ligeros que proporcionan imágenes en alta resolución y que precisan de buenas condiciones de luz para detectar los cambios de intensidad que se utilizan para determinar la información del objeto no cooperativo. De la misma forma los IR también utilizan imágenes, pero en su caso, detectan la luz infrarroja que emiten los objetos para realizar una estimación de su posición y movimiento. Asimismo, la implementación de los EO y IR puede aprovecharse para alertar de la presencia de hielo, fracturas o goteos en el vehículo durante el vuelo; elementos que afectan al mantenimiento y de muy difícil detección por parte de otros sistemas de abordó. Por su parte, los sensores acústicos detectan la información relativa del obstáculo a partir del sonido que emiten sus rotores/motores.

Por último, también es necesario poseer la información pertinente a la posición y al movimiento de los obstáculos a nivel de suelo. Para ello puede emplearse un *synthetic aperture radar* (SAR) [90], un dispositivo activo que a través de la emisión de múltiples pulsos puede generar una imagen de la ubicación real de los objetos en tierra y determinar la distancia y el *bearing* del UAV respecto a éstos.

Los radares y sensores aquí mencionados presentan diferentes características en cuanto a peso, tamaño, potencia requerida, alcance y pasividad. Por eso, la implementación de todos ellos puede tener graves consecuencias en el funcionamiento del UAV y más estudios deberán realizarse para determinar la combinación más óptima, menos perjudicial y con la mejor fiabilidad de datos para una plataforma múltiple de sistemas de un DAA con objetos no cooperativos. Igual que las actuaciones de los DAA con UAVs cooperativos y con vehículos tripulados civiles, las maniobras con objetos no cooperativos deberán acotarse a las presentadas en la SC-228.

En referencia a los DAA con obstáculos físicos fijos y con elevaciones del terreno, pueden emplearse los mismos radares y sensores presentados para operar teniendo en cuenta objetos no cooperativos.

Como se ha podido detectar después de este planteamiento, muchos son los sistemas que deben considerarse simultáneamente para un DAA autónomo. Con el objetivo estudiar una futura implementación de todos ellos se muestra en la *Figura 24* un resumen indicando el comportamiento que ofrecen en condiciones meteorológicas visuales (VMC), el comportamiento que ofrecen en condiciones meteorológicas instrumentales (IMC), el ratio de tamaño-peso-potencia (SWAP) que presentan, su coste y otras observaciones relevantes de cada uno de ellos.

	Information provided	VMC	IMC	SWAP	Cost	Others
TCAS	Range	✓	✓	×	×	Well proven
	Altitude					Widely used
ADS-B	Position	✓	✓	×	×	
	Altitude					Well proven
	Velocity					
SAR	Range	✓	✓	×	×	Typically poor accuracy
	Bearing					
LIDAR	Range	✓	✓	×	×	Easy configuration
						Narrow FOV
EO system	Azimuth	✓	×	✓	✓	Data link required
	Elevation					Lack of direct range
Acoustic system	Azimuth	✓	×	✓	✓	Data link required
	Elevation					Lack of direct range
IR system	Azimuth	✓	×	✓	✓	Delay
	Elevation					Data link required
						Lack of direct range

*Figura 24. Comparación entre los posibles sistemas presentes en una plataforma de múltiples sistemas.*

*Fuente: Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: Review and prospects [91].*

Es importante especificar que las maniobras de avoidance con cualquiera de los elementos presentados anteriormente es el último recurso para evitar la colisión en aire de un UAV destinado al transporte de mercancías. Para ello, y con el objetivo de reducir al máximo posible las colisiones potenciales en aire de la arquitectura, se propone asignar una planificación pre-táctica y táctica. Esta planificación se encuentra detallada y explicada en el [Anexo 3.2](#).

Tal y como se puede apreciar en dicho anexo, para garantizar un buen control operacional existe una fuerte dependencia de los servicios prestados por las administraciones del UTM/U-Space. Esta dependencia ya ha sido detectada por parte de las autoridades competentes y en la *Figura 25* se muestra un resumen de SESAR donde se identifican y clasifican todos los servicios que las autoridades tienen previsto suministrar.

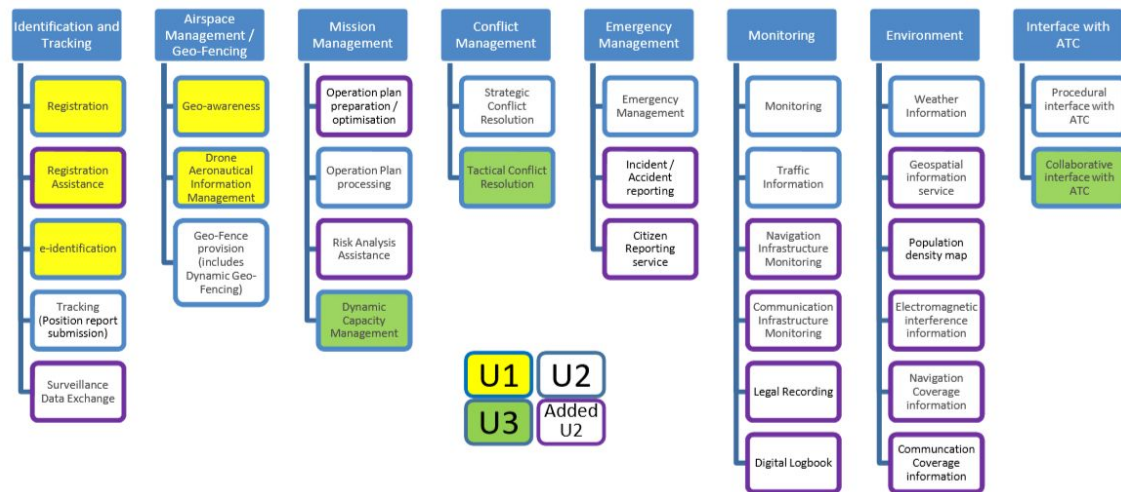


Figura 25. Servicios prestados por el U-Space.

Fuente: U-Space Concept of Operation [92].

Para mejorar la fluctuación de información entre los operadores, las ANSP, las administraciones del UTM/U-Space y los ATC, actualmente se está trabajando en un sistema interoperable que facilite toda la información necesaria desde un único punto de acceso. Este sistema basado en conexiones IP y que se pretende implementar, no únicamente para los UAS, sino también para la aviación convencional pilotada es conocido como sistema abierto de gestión de la información o SWIM [93].

Para finalizar, y aunque en cierta manera ha estado implícito durante el desarrollo de este apartado, cabe puntualizar que para llevar a cabo toda la seguridad operacional planteada es necesario que las comunicaciones del UAV estén destinadas tanto a poder controlar su navegabilidad como a poder recibir la información relevante de su operación. Para mejor redundancia y seguridad, es mejor que estas dos tareas se lleven a cabo de forma individual. En la arquitectura presentada el control de navegabilidad se puede realizar mediante el *data-link* más conveniente para la operación, mientras que la emisión de información se puede efectuar a través de un ADS-B. Este último sistema es recomendado por delante de los radares convencionales por su mejor exactitud de posición, su mayor ratio de actualización por minuto y su reducción en el coste y la complejidad de las estaciones de tierra [94]. Además, si se dispone de un ADS-B in, el UAV no es solamente capaz de emitir su información, sino que también es apto para recibir directamente los datos referentes de los otros vehículos.

Con el fin de que el *data-link* y el ADS-B sean métodos fiables de comunicación para la arquitectura, deben de estar protegidos contra las distintas formas de errores y ataques que pueden sufrir. A fecha de este trabajo, los errores y ataques más comunes que se han detectado son: *C2 link disruptions*, *global navigation satellite system jamming*, ataques *spoofing* y la manipulación de la información entre la GS y las administraciones del UTM/U-Space [95].

Para diseñar el control operacional de la arquitectura, en este apartado se ha definido el nivel de centralización necesario para transportar mercancías mediante UAS. Consecuentemente, se ha determinado las funciones y necesidades tanto de la GS como del piloto automático. Para ello, se ha presentado una forma de mejorar la exactitud del diseño de rutas, se ha discutido sobre los sistemas necesarios para disponer de un DAA sensible con todos los elementos capaces de causar conflictos potencialmente peligrosos y se han detectado los sistemas necesarios y los problemas a solventar de la red de comunicaciones que la arquitectura precisa. Además, se ha propuesto una metodología táctica y pre-táctica capaz de reducir conflictos y de validar planes de vuelo. Finalmente, también se ha mostrado el papel de las administraciones UTM/U-Space para garantizar la seguridad, así como los servicios que éstas deberán prestar en un futuro.

## **4.2. ESTRUCTURA DE LA RED DE RUTAS**

### **4.2.1. Business to business y envíos propios de una empresa**

Obviamente, el otro factor clave para la arquitectura del transporte de mercancías mediante UAS es el modelo de red de rutas empleado para las operaciones. Este modelo de red debe de unir los puntos geográficos de origen y destino de las mercancías de la forma más eficiente y segura posible. Para ello, es importante conocer las necesidades de los usuarios, y por lo tanto, se tomarán en consideración las observaciones realizadas durante el Capítulo 1.

Dicho apartado concluye que las empresas b2b que más podrían beneficiarse de la implementación de la arquitectura que presenta este proyecto son aquellas relacionadas con la venta y adquisición de bienes entrantes y/o bienes intermedios a través de la estrategia JIT. Además, como se ha justificado anteriormente, este tipo de relaciones presentan un gran número de pedidos repetitivos, puntos fijos y reducidos de origen-destino y áreas alejadas de zonas urbanas. Por ello, los b2b disponen del control de gran parte del espacio terrestre debajo del volumen operacional y, excepto por emergencias, de un espacio aéreo VLL libre de operaciones ajenas a su propio negocio. Todas estas características juntas proporcionan una alta flexibilidad a la hora de diseñar una red de rutas para el transporte de mercancías. Consecuentemente, se puede desarrollar la opción más eficiente para cada empresa, haciendo que la red se adapte a las necesidades del usuario y no éste a las de la red. A continuación, se muestran y analizan los cuatro modelos de red primarios para los b2b sin tener en cuenta posibles afectaciones por meteorología o obstáculos.



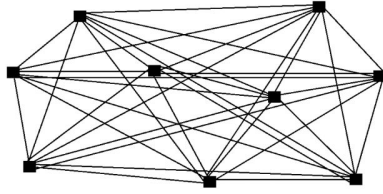


Figura 26. Red Punto a Punto.

Fuente propia.

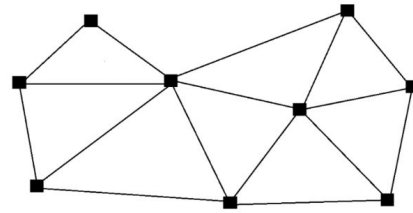


Figura 27. Red de Puntos Cercanos.

Fuente propia.

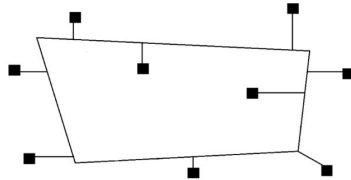


Figura 28. Red Periférica.

Fuente propia.

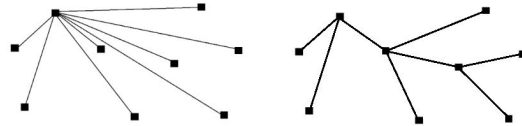


Figura 29. Red Centralizada directa e indirecta.

Fuente propia

En la *Figura 26* se observa una red de rutas punto a punto, caracterizada por enlazar todos los puntos de origen-destino entre sí mediante conexiones directas. Al emplearse siempre la ruta más óptima y rápida, es decir una línea recta entre los puntos de origen-destino, este tipo de red permite minimizar los tiempos de entrega y la potencia requerida para la operación. Asimismo, el uso de rutas directas implica seleccionar fuentes de energía capaces de cubrir sin paradas adicionales la distancia entre el origen y el destino. También se debe tener en cuenta que el elevado número de rutas provoca un elevado número de conflictos potenciales y, en consecuencia, un aumento de la posibilidad de que se generen retrasos en la arquitectura así como un incremento de la carga de trabajo desde todos los puntos de vista posibles. Por todo lo expuesto, esta red es recomendable para b2b que o bien requieran pocos puntos de origen-destino o bien requieren pocos pedidos, ya que los posibles conflictos y retrasos que se pueden generar hace inviable maximizar a la vez estos dos parámetros. Por otra parte, dicha red resulta también útil para empresa cuyos puntos se comportan a la vez como origen y como destino.

En la *Figura 27* se muestra una red de puntos cercanos que presenta únicamente conexiones entre puntos vecinos. Esta red está diseñada para evitar cruces entre rutas, y por lo tanto, para disminuir la complejidad operacional y los posibles conflictos que puedan surgir cuando se pretenda ejecutar distintos planes de vuelo simultáneamente. Este tipo de organización resulta eficiente para conectar puntos de origen y de destino alejados en distancia ya que sus rutas presentan paradas intermedias para repostar la fuente de alimentación pertinente de cada vehículos. De esta forma, no solamente se incrementa el rango de servicio sino también las clases de UAVs que pueden ser empleados para ello.

No obstante, la red de puntos cercanos no dispone de rutas directas entre los puntos origen-destino y distintas trayectorias pueden definirse para realizar una misma operación (*multipath*). Por esta razón, algoritmos de optimización deberán de usarse para así calcular la ruta más eficiente o la posición más conveniente de los puntos de parada. En comparación a la red punto a punto, ésta ofrece tiempos de entrega menores, pero puede ser utilizada cuando las instalaciones de la b2b son de origen, de recepción o ambas cosas a la vez.

En la *Figura 28* se presenta una red periférica, cuya estructura consta de una única ruta genérica que circula alrededor de los puntos implicados y de múltiples entradas y salidas que conectan la ruta genérica con los puntos origen-destino. Este tipo de organización es empleable cuando se dispone de vehículos capaces de ofrecer largos tiempos de vuelo y cuando varios puntos de origen-destino se encuentran separados por obstáculos o restricciones que impiden uniones mediante rutas más directas. El hecho de depender de una ruta genérica reduce la redundancia de toda la arquitectura, ya que una afectación en dicha ruta puede llegar a colapsar toda la red. Además, tal y como se puede observar, la red periférica proporciona una peor eficiencia que las redes punto a punto y de puntos cercanos y, consecuentemente, unos peores tiempos de entrega. La reducción de dicha eficiencia es causada por la obligación de rodear el obstáculo y de tener que curvar la ruta en comparación a la más óptima y directa. Por eso, a medida que aumenta el tiempo que el UAV circula por la ruta genérica más suele decrecer la eficiencia relativa resultante. Sin embargo, esta organización también ofrece algunos beneficios. Por ejemplo, la flexibilidad que los destinos puntos presentes en la red sean de origen, de destino o ambas cosas a la vez, así como la mejora en la seguridad operacional debido a la reducción tanto de la complejidad de la red como de los posibles conflictos potenciales.

Por su parte la *Figura 29* representa una red centralizada, pensada para conectar todos los puntos con uno solo. Este tipo de red está diseñada para b2b que tengan un punto central y deban, o bien recibir abastecimiento desde distintas instalaciones o bien abastecer desde dicho punto a distintas instalaciones. La red centralizada puede ser directa o indirecta, haciendo referencia si los vehículos empleados tienen la potencia necesaria para realizar la operación sin tener que efectuar una parada de repostaje o por lo contrario, no pueden realizar el plan de vuelo sin detenerse. La red centralizada directa presenta la mejor relación entre eficiencia y seguridad, ya que como se observa las rutas son directas y difícilmente crean conflictos potenciales entre ellas. Sin embargo en esta red se debe de disponer de un punto central suficientemente espaciado y equipado, sino se corre el riesgo de que éste se convierta en un cuello de botella para la arquitectura. Además, si no se posee el suficiente número de vehículos se debe de gestionar la forma en que éstos vuelven a su punto de origen para realizar más pedidos, ya que esta organización causa que los UAVs terminen agrupándose en un único punto y no resulta eficiente que realicen el mismo camino a la inversa vacíos. En cambio, la red centralizada indirecta presenta una peor eficiencia entre las rutas que unen los puntos origen-destino.

Pero, al realizar paradas intermedias, permite una mejor gestión para evitar situaciones de cuello de botella y desperdiciar recursos en viajes vacíos para recolocar vehículos al punto más conveniente.

De entrada, todas las redes descentralizadas pueden considerarse como bidireccionales. Sin embargo, una posible forma de mejorar su eficiencia y reducir a la vez conflictos potenciales consiste en detectar todas aquellas rutas entre puntos origen-destino que se prevean muy transitadas, convertirlas en unidireccionales y duplicarlas en sentido opuesto a una altitud superior. Esta técnica es especialmente eficaz para la red periférica, ya que si se duplica la red general en sentido opuesto, se aumenta considerablemente su eficiencia y se dobla instantáneamente la capacidad que ofrecer a la arquitectura. Duplicar la red resulta una estrategia innecesaria para las redes centralizadas, ya que éstas sólo van en una dirección y las nuevas rutas únicamente se emplearían para devolver los vehículos vacíos a su punto de origen, cosa que como ya se ha comentado no sería la mejor solución para gestionar la reubicación de los UAVs.

Como se ha mencionado los b2b disponen de una mayor flexibilidad a la hora de adaptar la red de rutas a sus necesidades, por ello parece lógico que quieran que ésta se ajuste lo máximo posible a su negocio. Como se ha podido apreciar todas las redes anteriores presentan ventajas e inconvenientes y por eso, lo más probable es que ninguna de ellas termine de satisfacer del todo al b2b. Por este motivo, es recomendable estudiar la implementación de una red mixta. Es decir, una red hecha a medida para el negocio en cuestión y que presente las características de dos o más de las cuatro redes básicas previamente descritas. Las redes mixtas suelen conllevar más conflictos potenciales que sus homólogas individuales y, al igual que la red de puntos cercanos, muestran un comportamiento *multipath* entre los puntos de origen-destino.

Finalmente, es importante resaltar la utilidad de los algoritmos de optimización para realizar la mejor ruta posible dentro de los límites de la arquitectura. Con su implementación se mejorará la eficiencia de las operaciones, los tiempos de entrega, la contaminación y el coste de combustible o electricidad. En el [Anexo 4.1](#) se argumenta sobre cuál de los algoritmos existentes puede ser el más recomendado. Asimismo, también se describe y ejemplifica teóricamente su funcionamiento.

#### 4.2.2. Business to client

Si se toman en consideración la características analizadas de los b2c, la red de rutas que éstas deben emplear es mucho más compleja. Dicha red debe poder conectar los distintos centros de distribución de las empresas con cualquier ubicación donde se encuentre el consumidor final. Además, debe de ser capaz de proporcionar seguridad y eficiencia a un alto número de operaciones y operadores simultáneamente, en áreas tan complejas y cambiantes como las zonas urbanas y adaptándose a la inmediatez y flexibilidad que exigen los pedidos realizados a través del *e-commerce*.

Para desarrollar una red así de compleja primeramente se debe considerar qué tipo de estructura es la más adecuada. Es decir, sobre qué estrategia organizativa se diseñarán las futuras rutas. En la *Figura 32, 33, 34 y 35* se puede determinar las prestaciones que ofrecen las cuatro estrategias más comunes según la demanda de uso de la arquitectura, donde *Low* representa la situación con menos entregas de mercancías por hora y *Ultra* la situación con más. En la estrategia *full mix* el tráfico de UAVs es completamente libre y solamente se consideran restricciones por meteorología, obstáculos fijos y obstáculos del terreno. La estrategia *layers* consiste en limitar la orientación horizontal de las operaciones por altitudes de vuelo, lo que permite viajar en una dirección únicamente en un rango de altitudes previamente establecido. Por su parte *zones* presenta una estrategia con varias circunferencias unidireccionales, conectadas entre ellas y organizadas alrededor del centro de la zona urbana. La estrategia más estructurada es la de *tubes*. En ella, se definen tres niveles donde hay disponibles carriles dimensionados para un único vehículo y que solamente intersecan entre sí en nodos predefinidos.

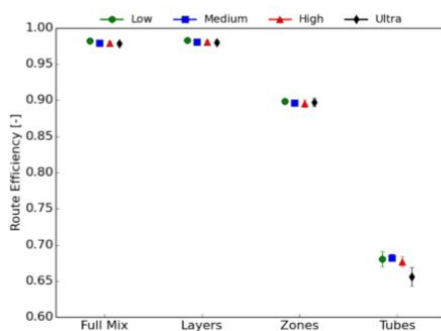


Figura 32. Eficiencia de la red en función de cada estrategia.

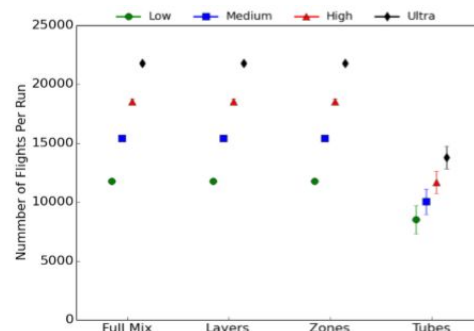


Figura 33. Capacidad de la red en función de cada estrategia.

Fuente: Metropolis: Relating Airspace Structure and Capacity for Extreme Traffic Densities [100].

Gracias a la *Figura 32, 33 y 34*, se puede determinar que la mejor estrategia para gestionar un elevado número de operaciones simultáneas y aleatorias en un espacio reducido como una zona urbana es la *layers*, ya que presenta la mejor relación entre la eficiencia de las rutas que se pueden emplear en ella, la capacidad total que proporciona la estructura y el número de conflictos potenciales que ésta presenta.

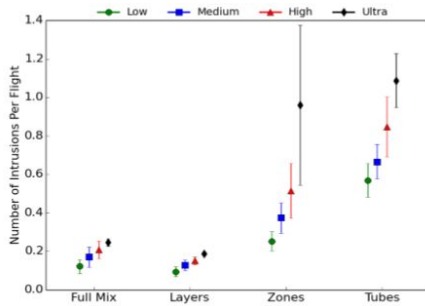


Figura 34. Número de conflictos en función de cada estrategia.

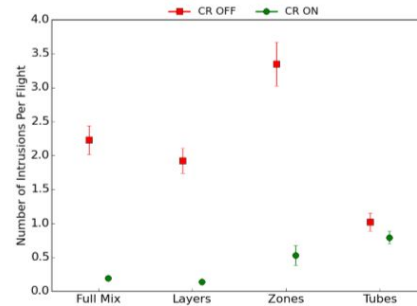


Figura 35. Número de conflictos de la red con y sin CR.

Fuente: Metropolis: Relating Airspace Structure and Capacity for Extreme Traffic Densities [100].

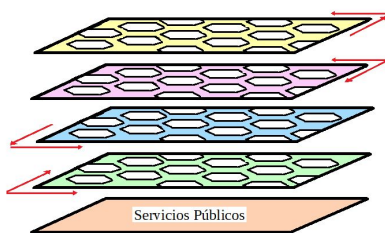
Sin embargo, a través de la *Figura 35*, se puede observar como *layers*, *full mix* y *zones* se basan íntegramente en el buen funcionamiento de las maniobras de avoidance del DAA (expresadas como CR en la figura) para ofrecer las ventajas que se acaban de describir.

Una estructura de red que tenga que depender únicamente del DAA para proporcionar seguridad, es una estructura que en sí misma no está pensada para mitigar posibles conflictos potenciales y que por lo tanto, su utilidad pretende aumentar la eficiencia y la capacidad a costa de reducir la seguridad. El elevado número de conflictos potenciales por vuelo que presenta una estructura como la de *layers* impediría la gestión pre-táctica expuesta en el apartado anterior, cuyo objetivo consiste en utilizar las maniobras de avoidance solamente como recurso en caso de emergencia. Emplear el DAA y dichas maniobras a nivel táctico como única fuente de resolución de conflictos reduce la redundancia total de la arquitectura en cuanto a seguridad. Este hecho contrasta con los fundamentos de la aviación, donde la seguridad siempre ha sido el objetivo principal de toda operación que pueda involucrar peligros para los seres humanos. De la misma forma, las estrategias no estructuradas *full mix* y *layers* tampoco están organizadas para tener en cuenta las posibles limitaciones meteorológicas ni los riesgos en tierra de las zonas urbanas. Algunos ejemplos de dichos riesgos que a día de hoy ya están contemplados de alguna manera en la legalidad son: las concentraciones de personas, los edificios que debido a su función o importancia presentan un VLL restringido y la posible contaminación acústica derivada del uso de los UAVs.

Por todos los motivos expuestos en el párrafo anterior, este proyecto presenta una red alternativa diseñada para aprovechar las beneficiosas cualidades de *layers* al mismo tiempo que se contemplan los riesgos en tierra y se disminuye el número de conflictos potenciales. Esta red, nombrada red colmena, consta de cinco capas y, a coste de una mínima reducción de la eficiencia, implementa carriles inspirados en *tubes* que permiten una mitigación pre-táctica de los conflictos potenciales.

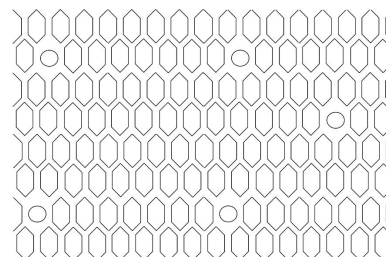
En la *Figura 36* se muestra la organización de las cinco capas en altitudes diferentes. La capa inferior está destinada al uso de los servicios públicos ya que, como se ha detallado al principio de este trabajo, dichos servicios necesitan prioridad para operaciones de emergencia vitales y a la vez, precisan de una interacción más directa con el espacio tierra. Destinando la capa inferior de la arquitectura a su uso exclusivo se pretende no interferir con sus necesidades y evitar los conflictos potenciales con las futuras rutas de la campaña que este proyecto pretende desarrollar. Por su parte, las cuatro capas restantes sí están destinadas al transporte de mercancías mediante UAS. Cada una de ellas está limitada a un movimiento máximo de  $90^\circ$  en el plano horizontal y se encuentra conectada con las capas adyacentes. De esta manera, con el conjunto de las cuatro, se dispone de los  $360^\circ$  necesarios para satisfacer todas las direcciones que un plan de vuelo pueda exigir. A parte de los beneficios presentados anteriormente por *layers*, el hecho de dividir las distintas direcciones en capas permite también evitar los conflictos *forward* entre dos UAVs, uno de los más peligrosos debido a la rápida velocidad relativa que existe entre los dos vehículos [101].

En la *Figura 37* se muestra en vista superior la organización básica de los carriles presentes en cada capa. A diferencia de *tubes*, estos carriles permiten al UAV variar la dirección preestablecida en cualquier momento que se precise, ofreciendo más flexibilidad a la arquitectura resultante. Además, esta característica brinda al vehículo de más posibilidades de resolución en caso de un conflicto potencial y por lo tanto incrementa también la seguridad de la arquitectura en comparación a *tubes*. El diseño de las capas debe de tener en cuenta las distancias de seguridad necesarias tanto vertical como horizontalmente. De esta forma se pretende disponer de carriles suficientemente espaciados para que puedan tolerar más de un vehículo a la vez y, parecido a los sistemas ACAS III de la aviación convencional, resoluciones y adelantamientos en los dos planos. Gracias a esta propiedad, al mismo tiempo que se vuelve a incrementar la seguridad, se aumenta la capacidad total por cada una de las capas. Con la implementación de la red de rutas mostrada en la *Figura 37* y las distintas capas de la *Figura 36*, se presenta una arquitectura capaz de llegar a cualquier punto de la zona urbana y que concede por sí misma la posibilidad de una mitigación pre-táctica de conflictos potenciales. Al mismo tiempo, y aun que hayan sufrido cierta degradación, esta arquitectura ofrece una capacidad y eficiencia más cerca a las expuestas por *layers*, que por las de *tubes*.



*Figura 36. Capas de la Red Colmena.*

*Fuente propia.*

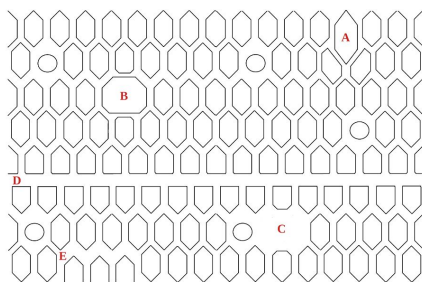


*Figura 37. Vista superior de una capa básica de la Red Colmena.*

*Fuente propia.*

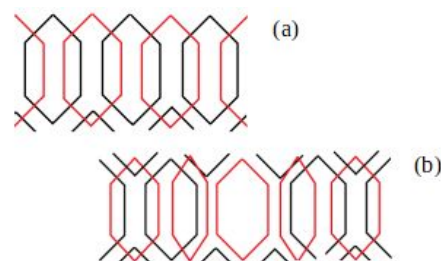
Otra característica de la red colmena es la consideración de las limitaciones causadas por meteorología o restricciones derivadas del nivel de tierra. Para ello, esta red dispone de los hexágonos presentes en la *Figura 37*. Dichos hexágonos simbolizan los espacios que delimitan los carriles y que por lo tanto que los UAVs no pueden cruzar. Al no tratarse de barreras físicas estas limitaciones pueden modificarse para adaptarse a las circunstancias presentes de una zona urbana. Por ejemplo, si en un punto concreto se agrupa una concentración de personas puede agrandarse el hexágono correspondiente de la capa básica para evitar que los vehículos circulen por encima suyo. De la misma manera, si existe algún edificio que requiera de protección, se puede ajustar uno de los hexágonos con su ubicación. Esta metodología permite adaptar la arquitectura a las características propias de cada zona urbana así como de las variantes condiciones que ésta presenta. Este tipo de modificaciones también son aplicables para mejorar la eficiencia en caso que la naturaleza de la zona lo permita. En la *Figura 38* se presenta una capa básica con las distintos cambios que se pueden implementar.

Por su parte, la *Figura 39* muestra como acoplando de la debida manera las distintas capas se puede también mitigar el ruido causado por la arquitectura sin influir a las limitaciones causadas por meteorología o por las restricciones derivadas del nivel de tierra. Dicha figura presenta en negro una capa inferior y en rojo una superior. En (a) se intercalan los carriles de cada nivel con el fin de evitar que todo el tráfico circule por encima de la misma área de la zona urbana concentrando todo el ruido generado en ella. Al mismo tiempo, (b) muestra como se puede superponer un hexágono limitante de distintas capas para proteger una infraestructura, una concentración de personas o una área meteorológica peligrosa.



*Figura 38. Modificaciones en vista superior de una capa de la red Colmena.*

*Fuente propia.*



*Figura 39. Superposiciones de dos capas de la red Colmena.*

*Fuente propia.*

En la *Figura 38*, el punto A y B muestran como pueden adaptarse los hexágonos de la red para delimitar una área protegida por alguna de las razones previamente mencionadas. En caso contrario, el punto C, presenta como ajustar la red si una misma área carece de cualquier tipo de restricciones y de un elevado nivel operacional. Finalmente, D y E exponen vías para mejorar la eficiencia de la arquitectura si las prestaciones de la zona urbana así lo permiten. Sin embargo, se debe recordar que estos nuevos carriles deben de ser unidireccionales y respetar la dirección ofrecida por cada capa.



A la vez, su implementación debe evitar cruces entre varios de ellos e ir acorde con las tecnologías DAA existentes en el momento de su implementación.

Para garantizar que los UAVs cumplen con los carriles delimitados por los hexágonos se puede implementar un sistema de *geofencing*. Este sistema, que actualmente ya se encuentra disponible en la industria, monitoriza de forma pasiva la ruta y se activa únicamente en caso de que el vehículo se acerque a unos límites verticales o horizontales previamente establecidos. Si el UAV finalmente accede a una área restringida, independientemente del control operacional que lo dirija, será devuelto al interior de un carril donde sí puede circular [102]. Este tipo de sistema justifica la elección del polígono hexagonal como forma para delimitar los carriles de cada capa. Esta figura geométrica es la segunda que más volumen engloba por cada metro cuadrado de su perímetro, solamente superada por la esfera. Sin embargo, en una misma superficie se puede disponer de un mayor número de hexágonos que de círculos. Si se toma en consideración estas dos características, el polígono hexagonal es una de las mejores figuras para proteger un mayor volumen con una menor superficie de *geofencing* y, al mismo tiempo, es la mejor para introducir más zonas protegidas en un único espacio.

El *geofencing* también resulta una buena herramienta para mejorar la eficiencia, la flexibilidad, la escalabilidad y la capacidad de la arquitectura. Ya que, si se dispone de la opción de activarlo y desactivarlo a placer, puede proporcionar a la red colmena la posibilidad de implementarse únicamente cuando ésta sea necesaria. En otras palabras, si en algún momento del día o en alguna área concreta de la zona urbana el tráfico de mercancías mediante UAS disminuye lo suficiente y consecuentemente el número de conflictos potenciales también, se puede instaurar la organización layers de forma momentánea. De esta manera se puede incrementar la eficiencia para algunas rutas. Las competencias para asignar los horarios y zonas en que se dispone de la red colmena, así como de las modificaciones pertinentes presentadas en la *Figura 38*, deberían establecerse como responsabilidades de las administraciones UTM/U-Space. Ya que en definitiva, al poseer la información de todos los planes de vuelo presentes y futuros, serán éstas las que dispongan de una visión global del tráfico y puedan realizar de la mejor manera posible las modificaciones necesarias.

Al diseñar una arquitectura para las b2c también se debe contemplar como llegar a la ubicación exacta de todos los clientes potenciales. Aun que la red propuesta pueda acceder a ellos, éstos deben de disponer de la infraestructura necesaria para realizar una entrega de forma segura y eficiente. Que los UAVs descendan a nivel de suelo en cualquier punto de una zona urbana no parece una buena opción teniendo en cuenta todas las dificultades e incidencias que pueden surgir. Disponer de vehículos terrestres que actúen como GS y que transporten mercaderías y UAVs hasta un punto concreto para que éstos realicen la fase final de las entregas [103] tampoco sería resolutorio. Ya que, por una parte no se soluciona la problemática de como acceder a la área del cliente y por otra, introducir grandes vehículos terrestres en zonas congestionadas como las urbanas podría contrarrestar los beneficios de los UAS en cuanto tiempo y contaminación. Este tipo de metodología, también conocida como *hybrid truck-drone delivery*, sería más rentable en zonas rurales.



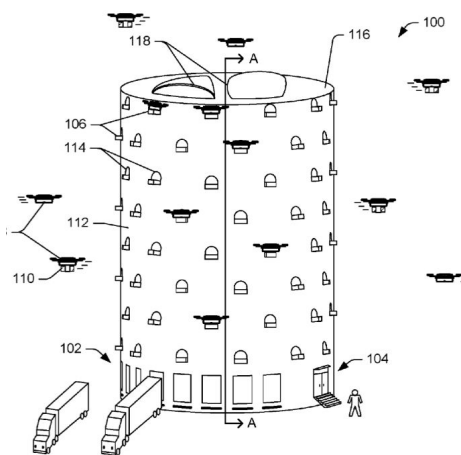
Para solventar dicha problemática, este proyecto expone tres alternativas distintas que sí pueden emplearse para acceder a todos los clientes potenciales de una zona urbana. La primera consiste en la edificación de torres avispero como la presentada en la *Figura 39*. La construcción de estas torres tanto a las entradas de las zonas urbanas como en distintos barrios internos de éstas podría proporcionar a las empresas una buena solución para la last-mile delivery. Para ello, camiones cargados deben acceder a las torres exteriores y depositar allí las mercancías ya organizadas e identificadas. Des de las torres de los contornos de la zona urbana se puede distribuir la mercancía mediante UAV a la torre interna más cercana a la ubicación del destinatario. Finalmente, el cliente podría acercarse a la torre a recoger la mercadería por sí mismo o, tal y como se realiza hoy en día, repartidores autorizados podrían entregarla en mano al cliente final. Esta metodología evita que la mercancía entre a las ciudades mediante vehículos terrestres y, consecuentemente, agiliza los tiempos de entrega y la contaminación de todo el servicio.

Si la mercancía a entregar ya se encuentra en la propia zona urbana y no precisa de un transporte previo hasta ella, la empresa emisora puede obviar el uso de las torres de la periferia y aprovechar únicamente las ubicadas en el interior de la ciudad. Por lo tanto, las torres adyacentes a las afueras de las zonas urbanas debería emplearse solamente para entregas que precisen entrar o salir de las grandes urbes.

Así mismo, las torres avispero podrían establecerse como base y equiparse tanto para almacenar los UAVs cuando éstos no tengan que operar como para realizar las tareas de asignación, planificación y mantenimiento pertinentes. Sin embargo, esta estrategia organizativa requiere de la construcción de varias torres a las afueras de la zona urbana y en cada uno de los barrios de ésta. Cabe la posibilidad de que no se consiga edificar las torres necesarias para que todos los clientes se encuentren cerca de una de ellas o para que las rutas que las conectan sean lo suficientemente cortas para ser realizadas con cualquier fuente de alimentación. Por eso, también puede ser necesario instalar sencillas plataformas fijas y elevadas que puedan servir de puente entre las torres o entre las empresas y los clientes que han quedado demasiado distanciados de los avisperos. En la *Figura 37* y *38* se representa en forma de círculo las torres avispero para mostrar una posible implementación de éstas en la red colmena.

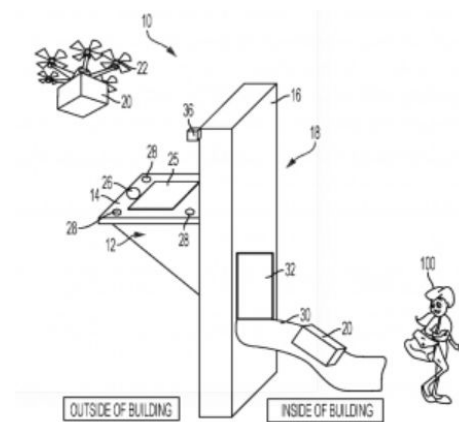
Otra opción viable para alcanzar la ubicación exacta de los clientes consiste en instalar un pequeña plataforma de despegue y aterrizaje en cualquier espacio abierto y privado del usuario, como pueden ser jardines o terrazas. Dicha estrategia permite desprenderse de la intervención humana en la última fase de la entrega y, por lo tanto, reducir los costes y esperas del servicio de mensajería convencional. Para ello, los clientes tendrían que habilitar el espacio y marcar el punto exacto de entrega con una imagen interpretable por alguno de los sensores de los UAVs. Sin embargo, esta estrategia no puede ser empleada por un gran número de clientes potenciales, ya que en las zonas urbanas no todos ellos disponen de acceso a una terraza o jardín. Además, dejar la mercancía a la intemperie hasta que ésta es recogida puede provocar daños o perjuicios en los productos entregados.

Por este motivo, este proyecto contempla positivamente la alternativa de modificar las edificaciones ya presentes en las zonas urbanas para que puedan disponer directamente de la opción de recibir mercaderías mediante UAS. Con el fin de que los edificios de los clientes finales puedan prestar este servicio, se precisa de la instalación de un o varios conductos con una plataforma elevadora capaz de recibir la mercancía en la parte superior del inmueble, dispensarla a la planta correspondiente y volver de nuevo arriba del todo para recibir nuevas entregas. Esta modificación de las edificaciones puede parecer costosa o de difícil implementación. Sin embargo, existen ejemplos recientes en la historia de las construcciones urbanísticas que demuestran como alteraciones similares se han realizado y popularizado con éxito en los últimos años. Un ejemplo de dichas modificaciones es la incorporación de los ascensores y del espacio necesario para su funcionamiento. En la *Figura 40* se presenta un esquema ya patentado para dicho cometido.



*Figura 39. Torre avispero.*

*Fuente: Multi-Level Fulfillment Center for Unmanned Aerial Vehicles [104].*



*Figura 40. Plataforma elevadora en edificios para la entrega de mercancías mediante UAS.*

*Fuente: Method and System for retrieving a package delivered by an unmanned aerial vehicle [105].*

Para poder implementar el transporte de mercancías mediante UAS para las b2c en las zonas urbanas se debe poder escalar progresivamente la arquitectura en función de la tecnología y la legalidad vigentes en el momento, así como de la aceptación popular y de las necesidades de los nuevos usuarios. Para ello, en el [Anexo 4.2](#) de este proyecto se presenta una implementación gradual basada en 4 fases distintas. Además, en dicho anexo también se detalla qué tipo de algoritmos y consideraciones precisan cada una de las fases.

Para terminar este apartado, cabe destacar la necesidad que en un futuro se realicen más estudios para corroborar a través de simulaciones y experimentos las ventajas teóricas presentadas y valoradas en estas páginas sobre la implementación de una arquitectura UAS de transporte b2c mediante una red colmena activable, modificable y escalable.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este estudio se ha presentado de forma teórica una arquitectura para el transporte de mercancías mediante UAS. Dicha arquitectura ha sido específicamente diseñada para dar soluciones a los posibles usuarios finales, los cuáles han sido identificados como empresas b2c que precisan de una *last-mile delivery* en zonas urbanas y empresas b2b con un modelo JIT de almacenamiento. Esta clase de b2c requiere sobrevolar áreas pobladas, múltiples puntos de entrega y destino, operaciones aleatorias en distancia y carga, un alto grado de flexibilidad y capacidad y una organización que pueda dar cabida a distintos operadores a la vez. Por su parte, los b2b mencionados disponen de un alto número de operaciones programadas y, por lo tanto, de una reiteración en los vehículos, las cargas y las rutas usadas. Además, este modelo de negocio suele poseer una mayor libertad a la hora de diseñar su propia arquitectura, ya que se encuentra en áreas geográficas alejadas de las zonas urbanas y dispone de un VLL libre de operaciones y operadores ajenos.

En la *Figura 41* se presenta un árbol de decisiones que resume las consideraciones que se han desarrollado en este trabajo y que deben sopesar aquellos usuarios interesados en hacer uso de la arquitectura diseñada.

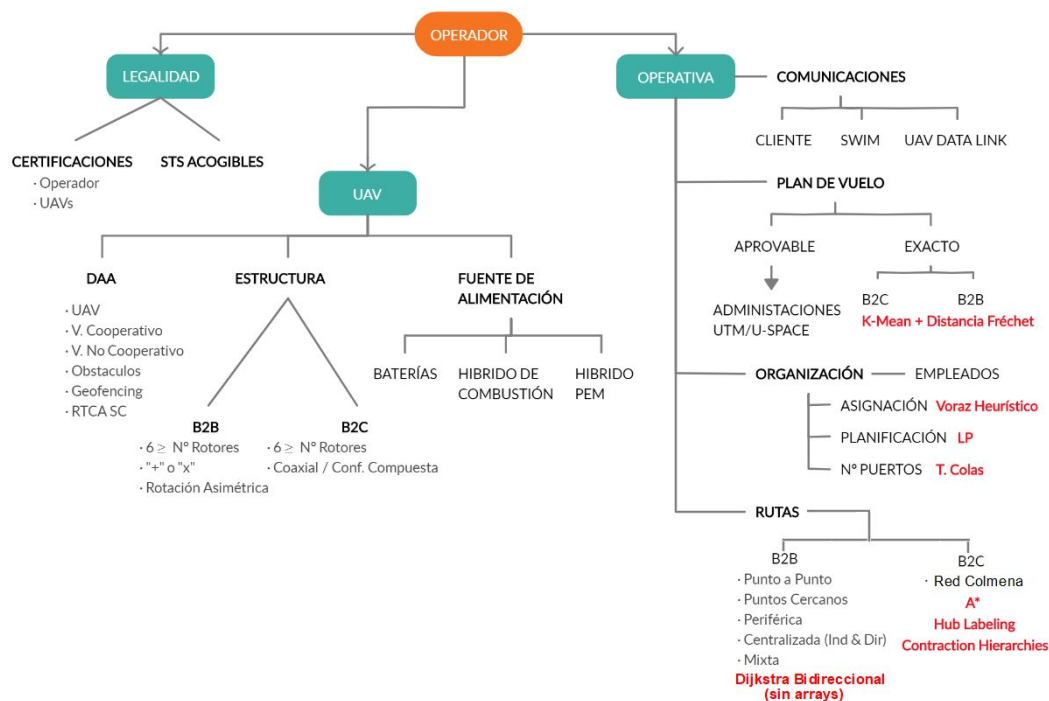


Figura 41. Árbol resumen de decisiones y consideraciones para operadores de la arquitectura diseñada.

Fuente propia.

En la *Figura 41* se pueden apreciar las relaciones que se precisan con las autoridades competentes y las distintas características más importantes que deben ofrecer los UAVs parcialmente descentralizados de una única GS para realizar entregas en la arquitectura.

Asimismo, también se nombran todas las consideraciones operacionales necesarias para llevar a cabo un servicio eficiente y seguro. Mencionados en rojo se encuentran los algoritmos descritos a lo largo del proyecto que ayudan a través de modelos matemáticos al correcto desempeño de dicha operativa.

Des del punto de vista de las autoridades competentes, este proyecto ha analizado los reglamentos delegados y de ejecución 2019/945 y 2019/947. A partir de éstos, se han determinado los parámetros más importantes des del punto de vista legal para las operaciones y los vehículos de la arquitectura. A través de ellos, también se han detectado las distintas limitaciones burocráticas que afectan directamente a la eficiencia y/o a los tiempos de entrega de un servicio de transporte de mercaderías mediante UAS. En este sentido, se ha utilizado el artículo 5 del apartado 5 del 2019/947 para desarrollar soluciones basadas en STS por sectores, autoridades delegadas y validaciones automáticas de planes de vuelo.

Además, durante este estudio se ha detallado los distintos servicios que deberán proporcionar en un futuro las autoridades competentes para el buen funcionamiento de la arquitectura. Entre ellos destacan el monitoraje de las operaciones, las planificaciones tácticas y pre-tácticas propuestas para evitar conflictos potenciales con otros elementos cooperativos, las interfaces colaborativas con ATC, el proveimiento de información relativa dentro del volumen operacional y la gestión dinámica del VLL. Referente a este último servicio se ha desarrollado una estructura distinta para cada uno de los dos usuarios finales. Para los b2b se han propuesto cuatro redes básicas y sus consecuentes redes mixtas y para los b2c se ha diseñado específicamente una red colmena activable, modificable y escalable, que a la vez contempla las posibles interacciones con operaciones de otros servicios futuros de los UAVs en las grandes urbes.

Finalmente, se citan a continuación aquellos elementos detectados durante este proyecto y que precisa de un mayor desarrollo e investigación para una implementación factible o una mejora sustancial de la arquitectura diseñada:

- Creación de STS capaces de evitar la disyuntiva descrita en el Capítulo 2
- Implementación funcional del SWIM.
- Desarrollo de protocolos de comunicaciones estandarizados y definiciones de actuaciones mínimas para sistemas UAS (MOPS).
- Sistemas de *avoidance* para UAVs compatibles con transponders y ACAS utilizados en la aviación convencional.
- Desarrollo de la combinación más óptima para una plataforma de múltiples sistemas de un DAA de objetos no cooperativos.
- Comunicaciones *data-links* y ADS-B con mínimas afectaciones por los ataques y errores presentados en el Capítulo 4.
- Recargas de baterías *wireless* para evitar aterrizajes de emergencia peligrosos.
- Correcta alteración de la arquitectura urbana.
- Mejora de la eficiencia y ruido de los rotores coaxiales.
- Mejora de la energía específica de las baterías eléctricas.

## ANEXOS

### ANEXO 1.

[\(Volver a 2.3.\)](#)

Una forma de poder comprender mejor los conceptos y ventajas que supondría la implementación de STS por sectores es la comparación entre dos operaciones iguales, en la misma categoría de espacio aéreo, en una zona rural geográficamente cercana y con un espacio terrestre controlado. Pero, una de ellas se encuentra al lado de un importante centro hospitalario que le causa muchas interferencias electromagnéticas, mientras que la otra se encuentra alejada de cualquier hospital y no tiene ningún tipo de interferencia electromagnética. Como se puede observar, las características del espacio donde estas dos operaciones pretenden ser autorizadas son distintas y, por lo tanto, deberán acogerse a diferentes STS de diferentes sectores. Suponiendo que los dos sectores en cuestión ya han sido analizados y la pertinente información ya figura en el sistema de la autoridad competente, a la hora de solicitar sus autorizaciones bajo los respectivos STS, ya se tendrá en cuenta que la primera operación no necesita ni destinar recursos ni aportar información sobre mitigaciones para una respuesta sanitaria de emergencia, pero sí lo necesita hacer sobre la robustez de los sistemas electrónicos presentes en el UAS. En cambio, para la segunda operación se deberá justificar la presencia de una respuesta sanitaria en caso de accidente pero no habrá la necesidad de demostrar por qué utiliza unos sistemas electrónicos más básicos.

Para la autoridad competente, este modelo también le resultaría más práctico, ya que cada vez que se solicite una autorización para operar bajo un STS no tendrían que revisar información reiterada y redundante, ya que en su sistema estarían almacenadas las características específicas de los sectores donde se encuentran dichos STS. Para seguir con el mismo ejemplo empleado hasta ahora, en la primera operación presentada, la autoridad competente no tendría que destinar tiempo en estudiar si las mitigaciones que supone tener el hospital cerca son adecuadas, ya que esta información ya figuraría en su base de datos y, por lo tanto, analizarlo nuevamente cada vez que se solicite una autorización para este sector en concreto sería una tarea reiterada y redundante que se podría obviar. Por otra parte, la autoridad competente si podría emplear el tiempo en estudiar si los elementos electrónicos son los apropiados, ya que los STS de este sector requiere unos de muy concretos. Para la segunda operación, sería nuevamente a la inversa. La autoridad competente se podría ahorrar estudiar la información relativa a la electrónica en el UAV y así centrarse en qué tipo de respuesta sanitaria hay preparada en caso de accidente. Como se puede ver, al haber realizado un estudio previo sobre los sectores, haber adaptado los STS a sus necesidades y al haber guardado la información pertinente, la carga de trabajo se ha reducido tanto para el solicitante como al autorizador y, además, se ha focalizado el proceso en los parámetros importantes de cada operación sin perder fiabilidad.

Evidentemente, en la vida real las solicitudes serán mucho más complejas y los elementos aquí presentados han sido utilizados únicamente con el fin de ilustrar los beneficios de los STS por sectores y no para mostrar la importancia que tendrían en éstos.

## ANEXO 2.

[\(Volver a 3.2.\)](#)

Distintos parámetros se deben a tener en consideración para realizar la optimización de las labores de asignación y planificación del servicio que pretende desarrollar este proyecto. Según el tipo de arquitectura en que las operaciones se lleven a cabo, más parámetros y restricciones se pueden añadir a la optimización para adquirir una organización más eficiente de un conjunto de baterías. Sin embargo, hay una serie de variables que siempre deberán estar presentes en toda operación ( $S_i$ ).

Estas variables fijas se dividen en aquellas relacionadas con la ruta a realizar ( $t_i$ ) y aquellas relacionadas con el cargado de las baterías ( $c_i$ ). Las variables  $t_i$  incluyen el momento en el que el UAV llega al punto de origen de la ruta ( $a_i^t$ ), el momento en que el UAV es despachado e inicia la operación ( $o_i^t$ ), la energía requerida para realizar la ruta especificada ( $e_i$ ), el tiempo de vuelo ( $l_i^t$ ) y el ID de la batería asignada ( $b_i$ ). Por su parte, las variables  $c_i$  comprenden el momento de inicio de la carga ( $o_i^c$ ), la energía que se precisa cargar ( $e_i$ ), el tiempo en que la batería debe de ser cargada para disponer de  $e_i$  ( $l_i^c$ ), el ID de la batería ( $b_i$ ) y el ID del cargador asociado a la batería  $b_i$  ( $ch_i$ ).

$$t_i \sim \{a_i^t, o_i^t, e_i, l_i^t, b_i\} \quad (3.12.) \quad R_i^t = [o_i^t, o_i^t + l_i^t] \quad (3.15.)$$

$$c_i \sim \{o_i^c, e_i, l_i^c, b_i, ch_i\} \quad (3.13.) \quad R_i^c = [o_i^c, o_i^c + l_i^c] \quad (3.16.)$$

$$s_i \sim \{t_i, c_i\} = s_i \sim \{a_i^t, o_i^t, l_i^t, o_i^c, l_i^c, e_i, b_i, ch_i\} \quad (3.14.) \quad R_i = [o_i^c, o_i^t + l_i^t] \quad (3.17.)$$

Por lo tanto, tal y como se muestra en (3.15.), (3.16.) y (3.17.), los rangos de tiempo que delimitan la operación  $S_i$  son el rango de carga  $R_i^c$ , el rango de la ruta  $R_i^t$  y el rango total de operación  $R_i$ . Finalmente, considerando que  $a_i^t$ ,  $l_i^t$  y  $e_i$  son valores que se pueden calcular de antemano, se debe determinar las  $o_i^t$ ,  $o_i^c$ ,  $l_i^c$ ,  $b_i$  y  $ch_i$  más óptimas para satisfacer las labores de asignación y planificación descritas anteriormente.

Distintos métodos matemáticos pueden emplearse para realizar la optimización de dichos parámetros. Si tomamos en consideración estudios previos que han utilizado esta misma clasificación de variables, que han optimizado la labor de asignación mediante un algoritmo voraz heurístico y la de planificación mediante la programación lineal de enteros, se puede vaticinar que esta estrategia puede llegar a reducir un 50% los tiempos de espera en el despacho de los UAVs y un 25% los costes totales derivados de un sistema de propulsión alimentado por baterías eléctricas [58].

## ANEXO 3.

### 3.1. Conexiones no lineales entre waypoints

[\(Volver a 4.1.\)](#)

Una posible forma de calcular el recorrido no lineal que realiza un UAV entre dos *waypoints* sin tener que modificar la tecnología vigente que genera líneas rectas entre ellos, consiste en añadir *waypoints* secundarios entre la trayectoria que une los *waypoints* principales predefinidos en una primera instancia. La ubicación de los *waypoints* secundarios puede determinarse con diferentes modelos matemáticos. Uno de ellos resulta de la estimación media de distintas rutas reales que han ejecutado el mismo plan de vuelo con anterioridad. Si se dispone de los datos experimentales de varios recorridos reales se puede, mediante el algoritmo iterativo *K-means clustering* [80], dividir una ruta en agrupaciones de puntos de posicionamiento y calcular la posición media dentro de cada una de ellas. Finalmente, tomando está posición media de cada agrupación y la ubicación de los *waypoints* principales, se puede determinar dónde deben colocarse los *waypoints* secundarios aplicando un algoritmo que minimice el recorrido a través de la distancia de Fréchet [81]. De esta forma se determina un plan de vuelo óptimo utilizando la experiencia operacional previa de una ruta y considerando las variaciones curvas que pueden existir entre dos *waypoints*.

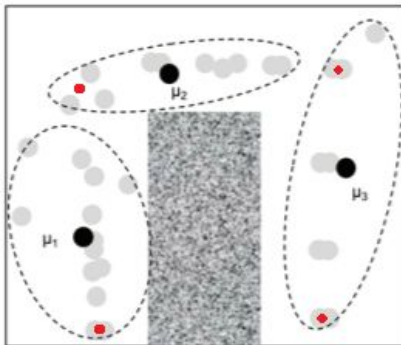


Figura 22. Agrupación y posiciones medias de una ruta.

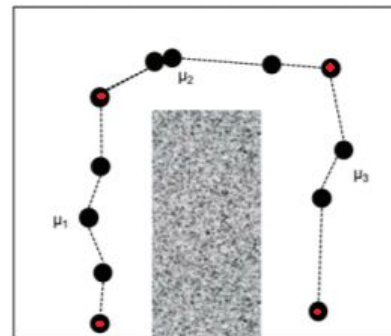


Figura 23. Ruta no lineal entre waypoints.

Fuente: Path Generation Method of UAV Autopilots Using Max-Min Algorithm [82].

En la *Figura 22* se puede observar las  $n$  agrupaciones y las posiciones medias ( $\mu_n$ ) de cada una de ellas para un conjunto de ubicaciones extraídas de distintas operaciones que han realizado un mismo plan de vuelo alrededor de un obstáculo. En la *Figura 23* se muestra la ruta final que debería presentarse y evaluarse para realizar los cálculos y la solicitud de un plan de vuelo. Es importante matizar que las figuras originales han sido modificadas para indicar la ubicación de los *waypoints* principales con puntos rojos. Dichos puntos se han añadido para exponer de forma gráfica como la unión entre ellos ha sido alterada con *waypoints* secundarios ofreciendo una alternativa más precisa a la línea recta con la que habitualmente se enlazan.



Aunque los sensores equipados en los UAVs tienen que ser previamente certificados y deben de proporcionar un error máximo aceptado por las autoridades competentes, existe la posibilidad que dichos sensores muestran pequeñas variaciones a la hora de realizar una misma ruta.

Estas pequeñas variaciones pueden suponer que la ruta predefinida o las maniobras para mantener la distancia de seguridad con un objeto varíen ligeramente, provocando que en algunos casos los vehículos se alejen un poco más o un poco menos de éste. Por esta razón, la metodología que se acaba de exponer también puede resultar útil para calcular la ruta media real que concluye de realizar el mismo plan de vuelo teniendo en cuenta las posibles variaciones experimentales que los sensores puede sufrir. Como se ha mencionado, de esta forma se mejora el cálculo del consumo de combustible y/o de electricidad y la fiabilidad de los tiempos de entrega, con las implicaciones en el coste y en la eficiencia de la operación que esto supone.

Este método puede resultar eficaz para mejorar los planes de vuelo que deberán realizar los pilotos automáticos en operaciones b2b. Sin embargo, un algoritmo que precise de varias toma de datos experimentales de cada una de las rutas y de un trabajo iterativo para calcular la mejor ubicación de los *waypoints* secundarios, puede no resultar la opción más eficiente para mejorar los planos de vuelo de una arquitectura que dispone un elevado número de rutas. Consecuentemente, otros modelos matemáticos deberán ser aplicados para realizar este estudio en las operaciones b2c.

### 3.2. - Planificación pre-táctica y táctica para conflictos potenciales

[\(Volver a 4.1.\)](#)

La planificación pre-táctica propuesta recae en la revisión por parte de las administraciones del UTM/U-space. Antes de dar la aprobación de un plan de vuelo éstas deberán de garantizar que la ruta planificada no presenta posibles conflictos con las otras que ya tengan validadas en su sistema, con objetos fijos en el volumen operacional, con la elevación del terreno y/o con zonas climáticas conflictivas. Para exponer los términos en el vocabulario empleado en este proyecto, si el plan de vuelo propuesto cumple con todos los requisitos y no presenta ningún conflicto, se le otorga el ACK. Si no cumple con alguna necesidad del STS del sector y/o presente conflictos con objetos fijos en el volumen operacional o con la elevación del terreno, se rechaza mediante un REJ. En el caso de que sí acate las restricciones del STS, pero exista un conflicto potencial con una ruta previamente validada o con una zona climática conflictiva se define como MAN y se pone en espera. De esta forma se puede ver la evolución de la meteorología o, en el caso que haya un conflicto con otra ruta, plantear trayectorias alternativas de mutuo acuerdo con los operadores para finalmente declarar el plan de vuelo como ACK o REJ. Se debe considerar que siempre tendrá preferencia la ruta validada con anterioridad y por lo tanto, a parte de mitigar posibles conflictos en la arquitectura, esta metodología presenta una organización *first come first served* (FCFS) para la aceptación de los planes de vuelo por parte de las administraciones



La planificación propuesta a nivel táctico involucra tanto a los operadores como a las administraciones del UTM/U-Space. Para evitar los posibles conflictos derivados de los imprevistos que puedan darse una vez ya se ha iniciado la operación, las administraciones deben aportar la información pertinente a los operadores para que éstos, a través de la GS, puedan actualizar de forma dinámica las variaciones en los límites del DAA del piloto automático a tiempo real. Esta información puede hacer referencia desde a posibles cambios en la meteorología hasta posibles fluctuaciones de grupos de personas dentro del volumen operacional. Aún así, puede ser que llegue a darse una situación de conflicto. Si esto sucede, el piloto automático debe alertar con antelación a la GS y presentar *reroutings* factibles que solucionen el conflicto en el que se encuentran sin generar otro con un elemento distinto presente en el volumen operacional. En el caso que el operador no escoja una solución a tiempo o el conflicto persista, el DAA y el piloto automático deberán realizar el *rerouting* que crean conveniente o, como última opción, llevar a cabo una maniobra de *avoidance* de forma unilateral. Esta metodología permite mantener al piloto automático informado de los posibles cambios en su plan de vuelo, decidir la solución más conveniente para el operador en caso de conflicto y reducir una vez más la posibilidad de colisión.

En la planificación táctica existen dos coyunturas en que la propuesta anterior debe ser matizada. La primera se da cuando se detecta un conflicto con aves moviéndose a altas velocidades. En este caso la latencia entre la detección y la maniobra a realizar es vital y, por lo tanto, el DAA del piloto automático debe de ser capaz de solucionar el conflicto sin la solicitud previa del operador. La segunda coyuntura se da cuando el UAV presenta un fallo técnico y precisa de un aterrizaje de emergencia. Cuando esto suceda el operador debe ponerse en contacto con las administraciones UTM/U-Space para coordinar un rerouting que permita tomar tierra lo más rápido posible. En el caso de que el fallo técnico sea una pérdida persistente del data-link, el piloto automático debe ser capaz de mantener la funciones mencionadas del DAA mientras realiza un aterrizaje de emergencia por sí solo.

Debido a esta segunda coyuntura los planes de vuelo deberán especificar procedimientos de contingencia y destinos alternativos de emergencia para su correspondiente ruta. Con el fin de determinar la ubicación o distancia máxima de estos destinos alternativos se podría simular la metodología usada en la aviación convencional y definir unos minutos ETOPS según las características de la operación.

## ANEXO 4.

### 4.1. - Algoritmos de optimización de redes multipath

[\(Volver a 4.2.1.\)](#)

A día de hoy, distintos algoritmos pueden emplearse para detectar la mejor ruta posible de todas aquellas disponibles en una red *multipath*. Teniendo en cuenta el tamaño reducido de una posible red en instalaciones b2b, que gran parte de los pedidos pueden ser organizados con antelación y que existen pocas probabilidades que se soliciten muchos pedidos de emergencia a la vez, se puede tomar en consideración algoritmos que, aún siendo un poco más lentos, proporcionen una menor complejidad y no requieran ni de tiempos de pre-procesado ni de memoria extra en el postprocesado [96]. Los algoritmos más sencillos que presentan estas características son el Bellman-Ford y el Dijkstra, aunque sabiendo de antemano que los pesos de la red nunca serán negativos y que éste segundo presenta soluciones más rápidas que el primero, en este proyecto se presenta únicamente el algoritmo de Dijkstra [97].

Tal y como muestra la *Figura 30*, para optimizar la ruta a través del algoritmo de Dijkstra primero se debe asignar un peso a cada segmento de la red. Dicho peso representa el incremento que sufre la variable que se desea optimizar si la ruta finalmente circula por ese segmento. En el caso de una red para el transporte de mercancías el peso puede representar la potencia requerida, el tiempo de vuelo o una variable que muestre ambas cosas a la vez y, por lo tanto, cuanto mayor sea éste peor va a resultar la operación. En la *Figura 31* se presenta la optimización de Dijkstra para realizar una ruta en la *Figura 30* desde el punto S al punto E, donde el subíndice de color verde acumula la suma de todos los pesos de los segmentos recorridos para llegar a un punto concreto. A fin de llevar a cabo este algoritmo se precisan de tres funciones y de un estudio punto a punto. La primera consiste en recorrer todos los segmentos conectados al punto que se analiza y contabilizar cuánto aumenta el peso acumulado para cada uno de ellos. La segunda compara todos los nuevos puntos alcanzados con aquellos visitados anteriormente. De esta forma evita que el algoritmo intenta calcular una ruta pasando por el mismo sitio dos veces y, a la vez, determinar si existe una trayectoria más óptima para llegar al punto que está comparando. La tercera función reorganiza todos los puntos que se analizarán en la siguiente iteración para calcular primero las rutas que presentan un mejor comportamiento y así llegar antes a una posible solución.

Gracias a iterar estas tres funciones el algoritmo encuentra el punto de destino, cuando esto sucede simplemente se tiene que comparar el peso acumulado con el de las otras rutas potenciales. Si el peso acumulado del punto de destino es menor que todos los otros significa que ya se ha detectado la ruta más óptima, sino se debe seguir iterando los demás puntos hasta que superen el peso acumulado del destino encontrado o hasta que se presente una ruta completa más óptima.

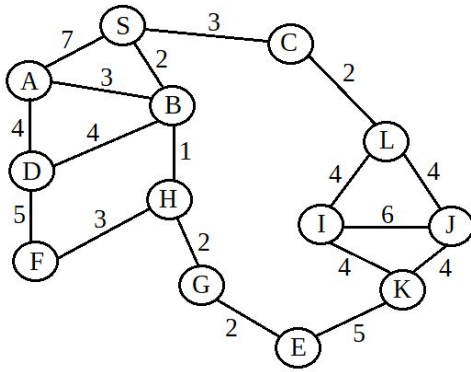


Figura 30. Red de rutas para un b2b con asignación de pesos.

Fuente propia.

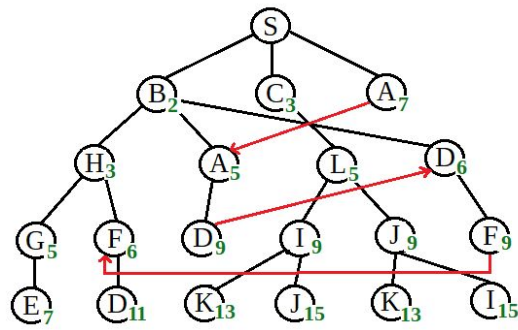


Figura 31. Resolución del algoritmo de Dijkstra para la ruta S-E.

Fuente propia.

Para ejemplificar este algoritmo se presenta la *Figura 31*. En ella, una vez se ha realizado la primera iteración para encontrar la ruta más óptima entre S y E, el algoritmo debe de aplicar la primera y la segunda función para los puntos B, C y A. Des del punto B se calcula el peso acumulado para llegar a A, H y D. Gracias a la segunda función, se evita computar inútilmente el segmento B-S anulando la primera iteración y permitiendo que el algoritmo pueda avanzar a través de la red. Además, al comparar los nuevos puntos alcanzados con los previamente estudiados, es fácilmente apreciable como al punto A se puede llegar tanto des del segmento S-A como des del segmento B-A. Después de considerar el peso acumulado de cada uno de ellos ( $7 > 5$ ) el algoritmo puede descartar todas las rutas que circulen por el primero y centrarse únicamente con aquellas que lo hacen por el segundo. Una vez estudiado los segmentos unidos al punto C, se puede emplear la tercera función y organizar los puntos H, A, L y D según su peso acumulado. Esta metodología es repetida dos veces más hasta dar con el punto E. Como se puede apreciar, el peso acumulado de éste es inferior a todas las otras trayectorias potenciales y, por lo tanto, la ruta más óptima ha sido calculada como la S-B-H-G-E.

Para qué algoritmo de Dijkstra presente su máxima eficiencia computacional actualmente existen dos consideraciones que deben tenerse en cuenta. Una de ellas consiste en emplear de forma bidireccional, es decir, calcular simultáneamente las rutas óptimas origen-destino y destino-origen hasta que se encuentran en un punto intermedio [98]. La otra recomienda evitar el almacenamiento y las operaciones con *arrays*, ya que sus tiempos de ejecución responderían a  $O(n^2)$ . En su lugar, resulta más recomendable ayudarse del montículo de Fibonacci o del montículo binario, que presentan tiempos de ejecución  $O(m+n\log(n))$  y  $O((m+n)\log(n))$  respectivamente [99]. Donde  $n$  representan el número de vértices y  $m$  el número de segmentos.

También es importante matizar que a la práctica se deben implementar más limitaciones para que este algoritmo pueda ser funcional. Por ejemplo, a partir de qué peso acumulado el vehículo precisa de repostaje, qué puntos pueden ser empleados para ello, qué tiempos de espera se puede encontrar a lo largo de la ruta o qué prestaciones presenta el vehículo en cuanto a peso, velocidad y ratio de giro. Además, para poder realizar esta optimización se debe también considerar incorporar otros algoritmos para el control de la información genérica de la red, como las afectaciones y limitaciones transitorias en rutas concretas o la afectación del clima en la asignación de pesos. Estas tareas pueden ser realizadas mediante algoritmos *spatial indexing* y/o *computational geometry*.

Si finalmente el algoritmo de Dijkstra resulta poco eficiente porque se aumentan el número de puntos en la red o crece notablemente la cantidad de operaciones diarias, es recomendable usar algoritmos heurísticos más rápidos y complejos como el A\*, el *Hub Labeling* o el *Contraction Hierarchies*.

#### **4.2. - Fases para la implementación del transporte mediante UAS en zonas urbanas**

[\(Volver a 4.2.2.\)](#)

Este proyecto presenta una implementación gradual basada en 4 fases distintas para poder incorporar gradualmente la arquitectura del transporte de mercancías mediante UAS en las grandes urbes. De esta forma se pretende acatar mejor la legalidad vigente del momento, incorporar los nuevos avances tecnológicos que se vayan desarrollando en el sector, mitigar los posibles efectos negativos de incluir este servicio directamente y poder detectar modificaciones necesarias en base al funcionamiento de las primeras fases. Con esta metodología se pueden corregir errores antes de una inversión e implementación definitiva, a la vez que se concientia a la población del uso y características de este nuevo servicio.

En la primera fase únicamente son admitidos los servicios públicos. Para su buen funcionamiento se puede emplear una red *full mix* y permitir que los UAVs pertinentes dispongan de la eficiencia y flexibilidad que requieren sus operaciones. En la segunda fase se incorporan a los servicios públicos las torres avispero y las plataformas elevadas fijas para transportar mercaderías mediante UAVs. Para ello, se puede establecer la estrategia *layers*. Sin embargo, en el caso de que aumente exponencialmente el número de torres o de operaciones es recomendable instaurar ya en este periodo la red colmena. En la tercera fase, a parte de los servicios de las dos anteriores, se añade la posibilidad que las empresas que dispongan de un puerto propio de despeje y aterrizaje aprobado puedan usarlo para trasladar mercancías a las torres avispero.

Por último, en la fase cuatro, se autoriza la entrega directa a los clientes finales. Ya sea mediante puertos en jardines y terrazas o con plataformas elevadoras móviles instaladas en sus inmuebles. Para la fase tres y cuatro, se debe tener ya en pleno funcionamiento la red colmena para poderla activar y modificar siempre que las administraciones UTM/U-Space lo consideren oportuno.

Como es observable, a medida que el transporte de mercancías mediante UAS se estructura aumenta la presencia de la red colmena en la arquitectura. Al disponer de un gran número de puntos y rutas disponibles, el algoritmo de Dijkstra presentado para los b2b no resulta como la mejor opción para optimizar los planes de vuelo. Por ello, es recomendable recurrir a algoritmos heurísticos más rápidos y complejos como el *A\**, el *Hub Labeling* o el *Contraction Hierarchies*. Con una total preferencia para este último, ya que es capaz de ofrecer los mejores tiempos de computación sin precisar de mucho pre-procesado ni de demasiada memoria de post-procesado [96].

Finalmente es importante destacar la necesidad de realizar nuevos estudios antes y durante cada fase para determinar el espaciado de tiempo más óptimo entre cada una de ellas. De esta forma se espera que las fases puedan ser aplicadas en cualquier zona urbana y se adapte de la mejor manera posible a cada situación y población.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Darryl Jenkins, Bijan Vasigh, Clint Oster, Tulinda Larsen. *Forecast of the Commercial UAS Package Delivery Market*. 2017. Available Online: <https://news.erau.edu/-/media/files/news/forecast-commercial-uas-package-delivery-market.pdf?la=en>
- [2] Tasha Keeney. *Autonomous Ridehailing Could Be More Profitable Than We Had Modeled*. ARK Invest. 2020. Available Online: <https://ark-invest.com/research/autonomous-ridehailing-fees>
- [3] MarketsandMarkets. *Drone Package Delivery Market by Solution (Platform, Infrastructure, Software, Service), Duration, Range, Package Size, Region, Global Forecast to 2030*. 2019.
- [4] Primal Kopardekar. *UTM RTT Plan: FAA & NASA Collaborative Effort Planned Through September 2020*. FAA & NASA collaborative action plan. 2017.
- [5] Joachim Lücking. *What is the EU doing to deliver the U-Space?*. DG Move – Madrid. 2019.
- [6] Luigi Ranieri, Salvatore Digiesi, Bartolomeo Silvestri, Michele Roccotelli. *A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision*. 2018.
- [7] United Nations Report. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. Available online: <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.pdf>
- [8] McKinsey & Company. *Parcel delivery: The future of last mile*. 2016. Available Online: [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/travel%20transport%20and%20logistics/our%20insights/how%20customer%20demands%20are%20reshaping%20last%20mile%20delivery/parcel\\_delivery\\_the\\_future\\_of\\_last\\_mile.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/travel%20transport%20and%20logistics/our%20insights/how%20customer%20demands%20are%20reshaping%20last%20mile%20delivery/parcel_delivery_the_future_of_last_mile.ashx)
- [9] Food and Agriculture Organization of United Nations & International Telecommunication Union. *E-Agriculture in Action: Drones for Agriculture*. Article by Sustainability 2018, 10-782. 2018.
- [10] Lina Tang, Guofan Shao. *Drone remote sensing for forestry research and practice*. Article by Journal of Forestry Research. 2015. DOI: 10.1007/s11676-015-0088-y
- [11] Joshua K. Stolaroff, Constantine Samaras, Emma R. O'Neill, Alia Lubers, Alexandra S. Mitchell, Daniel Ceperley. *Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery*. Article by Nature Communications. 2018. DOI: 10.1038/s41467-017-02411-5.
- [12] J.Clement. *E-commerce in the United States – Statistics & Facts*. Dossier of Statista. 2019.
- [13] Gonzalo Ibañez, Elena Lostalé, José Manuel Pizarro, Álvaro Ribagorda. *Evolución y perspectivas de e-commerce para 2019*. Study by Kanily & D/A Retail. 2019.
- [14] Timothy R. Gulden. *The Energy Implications of Drones for Package Delivery*. Article by the RAND Corporation. 2017.
- [15] Yunfei Ma, Nicholas Selby, Fadel Adib. *Drone Relays for Battery-Free Networks*. Massachusetts Institute of Technology. SIGCOMM '17. 2017.
- [16] Larry Hardesty. *Drones relay RFID signals for inventory control*. Published in MIT News Office. 2017. Available Online: <https://news.mit.edu/2017/drones-relay-rfid-signals-inventory-control-0825>

- [17] Heung Suk Hwang, Gyu Sung Cho. *A performance evaluation model for order picking warehouse design*, Computers & Industrial Engineering Vol. 51(2), pages: 335-342. 2006.
- [18] Telematel. *Adopta estas 2 medidas y evita materiales obsoletos*. Article in Logística y Almacén. 2018. Available online: <https://www.telematel.com/blog/material-obsoleto-telematel/>
- [19] Vanessa Petit, Laura Bertran. *Drones: el volante que llega del cielo*. Article in Industria 4.0, Seat Website. 2019. Available online: <https://www.seat-mediacentr.es/storiespage/newstories/Drones-el-volante-que-llega-del-cielo.html>
- [20] NewStream Entreprises. *What Industries Benefit From Just-In-Time Delivery Systems?* Article by NewStream Blog. 2019. Available Online: <https://www.newstreaming.com/blog-hub/what-industries-benefit-from-just-in-time-delivery-systems>
- [21] Global Manufacturing. *Top 10: Lean manufacturing companies in the world*. Article by Global Manufacturing. 2014. Available Online: <https://www.manufacturingglobal.com/top-10/top-10-lean-manufacturing-companies-world>
- [22] Zacc Dukowitz. *What is an orthomosaic map? How these maps are helping catch bad guys, grow crops and keep people safe*. Article by UAV Coach. 2017. Available online: <https://uavcoach.com/drones-orthomosaic-map/>
- [23] Stephen Rice. *10 Ways That Police Use Drones To Protect And Serve*. Article by Forbes. 2019. Available online: <https://www.forbes.com/sites/stephenrice1/2019/10/07/10-ways-that-police-use-drones-to-protect-and-serve/#7c8817276580>
- [24] Enterprise UAS. *Firefighting drone infographic*. Dronefly Website. 2017. Available online: <https://www.dronefly.com/firefighting-drones-drones-in-the-field-infographic>
- [25] Burchan Aydin, Emre Selvi, Jian Tao, Michael J. Starel. *Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting*. Article by MDPI. 2019. doi:10.3390/drones3010017.
- [26] Federal Aviation Administration. *Drones and Wildfires are a toxic mix*. Digital Toolkit. Available online: [https://www.faa.gov/uas/media/FAA\\_drones\\_wildfires\\_toolkit.pdf](https://www.faa.gov/uas/media/FAA_drones_wildfires_toolkit.pdf)
- [27] Joseph Phillips. *Medical Unmanned Aerial System for Organ Transplant Delivery*. Thesis. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.28471.57769 .
- [28] *Flying Taxis in Singapore to test cleaner, quieter sky ride*. The Business Times. 2019. Available Online: <https://www.businesstimes.com.sg/transport/flying-taxis-in-singapore-to-test-cleaner-quieter-sky-ride>
- [29] Robin Kellermann, Tobias Biehle, Liliann Fisher. *Drones for parcel and passenger transportation: A literature review*. Article in Karl Kim's PhD ISSN: 2590-1982. 2019.
- [30] Larry Husten. *Grad Student Invents Flying Ambulance Drone to Deliver Emergency Shocks*. Forbes.com Pharma & Healthcare blog. 2014. Available Online: <https://www.forbes.com/sites/larryhusten/2014/10/29/grad-student-invents-flying-ambulance-drone-to-deliver-emergency-shocks/#1f7495fc1bfc>



- [31] *Ehang Expands in Europe with First UAM Program in Seville, Spain*. Ehang website. Available Online: <https://www.ehang.com/news/615.html>
- [32] *Singapore in talks with firms to try out "flying taxis"*. The Business Times. 2017. Available Online: <https://www.businesstimes.com.sg/transport/singapore-in-talks-with-firms-to-try-out-flying-taxis>
- [33] Jane Wakefield. *Dubai tests drone taxi service*. BBC News. 2017 Available Online: <https://www.bbc.com/news/technology-41399406>
- [34] Reglamento de ejecución (UE) 2019/947. Normas y procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas. Comisión Europea. 24/05/2019.
- [35] 14 CRF PART 107. Small Unmanned Aircraft Systems. Federal Aviation Administration. 21/06/2016. Available Online: [https://www.faa.gov/uas/media/part\\_107\\_summary.pdf](https://www.faa.gov/uas/media/part_107_summary.pdf)
- [36] *UAS Activities In China. Presentation of China Civil Aviation Regulations Part:92. Safety Management Rules for RPAS*. Civil Aviation Administration of China. Available Online: <https://www.icao.int/Meetings/RPAS3/Documents/Presentations/3.4.1%20CHEN%20Guangcheng.pdf>
- [37] Marc Pérez. *Specific Operations Risk Assessment v2.0*. Ajuntament de Barcelona. 2019.
- [38] *JARUS Guidelines on Sora, Annex A*. Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. 2017. Document Identifier: JAR-DEL-WG6-D.04
- [39] EASA Presentation. Standard Scenarios at the European Aviation Safety Agency. UAS Workshop. Cologne. 2018.
- [40] ORUS. *U-space Concept of Operations*. 2019.
- [41] European Union Aviation Safety Agency. Opinion No 05/2019: Standard scenarios for UAS operations in the "specific category". 2019. Available Online: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Opinion%20No%2005-2019.pdf>
- [42] Vahram Stepanyan, Kalmanke Krishnakumar. *Estimation, Navigation and Control of Multi-Rotor: Drones in an Urban Wind Field*. NASA Ames Research Center. 2017. |DOI: 10.2514/6.2017-0670.
- [43] Carlos Xisto, José Páscoa, Jakson A. Leger, Pierangelo Masarati. *Numerical Modelling of Geometrical Effects in the Performance of a Cycloidal Rotor*. 2014. DOI:10.13140/2.1.1252.1600.
- [44] Kewwi Li, Yiran Wei, Chao Wang, Hongbin Deng. *Longitudinal Attitude Control Decoupling Algorithm Based on the Fuzzy Sliding Mode of a Coaxial-Rotor UAV*. 2019.
- [45] Hyo Won Kim, Richard E. Brown. *A Comparison of Coaxial and Conventional Rotor Performance*. Journal of the American Helicopter Society. 2010. Available Online: [https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/523811/Brown\\_RE\\_-\\_strathprints\\_-\\_A\\_comparison\\_of\\_coaxial\\_and\\_conventional\\_rotor\\_performance\\_Jan\\_2010.pdf](https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/523811/Brown_RE_-_strathprints_-_A_comparison_of_coaxial_and_conventional_rotor_performance_Jan_2010.pdf)
- [46] Wayne Ong, Henrik Hesse. *Design Methodology for Heavy-Lift Unmanned Aerial Vehicles with Coaxial Rotors*. 2019. DOI: 10.2514/6.2019-209.



- [47] Shi Dongjie, Tang Binxian, Quan Quan. *Reliability Analysis of Multicopter Configurations Based on Controllability Theory*. School of Automation Science and Electrical Engineering. 2016. Available Online: <http://rfly.buaa.edu.cn/doc/2016ShiRelAnaCtrl.pdf>
- [48] Vahram Stepanyan, Kalmanje Krishnakumar, Alfredo Bencomo. *Identification and reconfigurable Control of Impaired Multi-Rotor Drones*.
- [49] Michael C. Achtelik, Klaus-Michael Doth, Daniel Gurdan, Jan Stumpf. *Design of a Multi Rotor MAV with regard to Efficiency, Dynamics and Redundancy*. 2012. DOI: 10.2514/6.2012-4779.
- [50] *Amazon testing drones for deliveries*. BBC News Article. 2013. Available Online: <https://www.bbc.com/news/technology-25180906>.
- [51] Hyo Won Kim, Karthikeyan Duraisamy, Richard Brown. *Aeroacoustics of a Coaxial Rotor in Level Flight*. Rotorcraft Aeromechanics Laboratory, University of Glasgow. Available Online: [https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/505030/Brown\\_RE\\_-\\_strathprints\\_-\\_Aeroacoustics\\_of\\_a\\_coaxial\\_rotor\\_in\\_level\\_flight\\_Apr\\_08.pdf](https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/505030/Brown_RE_-_strathprints_-_Aeroacoustics_of_a_coaxial_rotor_in_level_flight_Apr_08.pdf)
- [52] J. Verbeke, D. Hulens, H. Ramon, T. Goedemé and J. De Schutter. *The Design and Construction of a High Endurance Hexacopter suited for Narrow Corridors\**. 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, FL, 2014. DOI: 10.1109/ICUAS.2014.6842296.
- [53] Fernando Isorna, Álvaro Fernández, José Antonio Bogeat, Francisa Segura, José Manuel Andujar. *Converting a Fixed-Wing Internal Combustion Engine RPAS into an Electric Lithium-Ion Battery- Driven RPAS*. Applied Sciences. 2020. DOI:10.3390/app10051573.
- [54] Tan Chang, Hu Yu. *Improving Electric Powered UAVs' Endurance by Incorporating Battery Dumping Concept*. Procedia Engineering 99 ( 2015 ) 168 – 179. 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.522.
- [55] Chin E. Lin. *Development of Dual Power Multirotor System*. International Journal of Aerospace Engineering. 2017.
- [56] Myeong-hwan Hwang, Hyun-Rok Cha, Sung Yong Jung. *Practical Endurance Estimation for Minimizing Energy Consumption of Multirotor Unmanned Aerial Vehicles*. Article in Energies 2018, 11, 2221. 2018. DOI: 10.3390/en11092221
- [57] A. Millner. *Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles*. 2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, Waltham, 2010, pp. 349-356. 2010. DOI: 10.1109/CITRES.2010.5619782.
- [58] S. Park, L. Zhang and S. Chakraborty. *Battery assignment and scheduling for drone delivery businesses*. 2017 IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED), Taipei. Pp. 1-6. 2017. DOI: 10.1109/ISLPED.2017.8009165.
- [59] Zhi-ning Liu, Xia-qing Liu, Lu-jian Yang, David Leo, Hong-wei Zhao. *An Autonomous Dock and Battery Swapping System for Multirotor UAV*. 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.19437.90085.
- [60] K. A. Suzuki, P. Kemper Filho, J. R. Morrison. *Automatic battery replacement system for UAVs: Analysis and design*. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2012.
- [61] PowerLight Technologies. *Laser-powered quadcopter endurance demonstration by LaserMotive*. 2010. Practical demonstration. Available Online: <https://www.youtube.com/watch?v=8hhv9Cu98us>

- [62] Jie Ouyang, Yueling Che, Jie Xu, Kaishun Wu. *Throughput Maximization for Laser-Powered UAV Wireless Communication Systems*. IEE International Conference on Communications Workshops, Kansas City. 2018. DOI: 10.1109/ICCW.2018.8403572.
- [63] Mohamed Nadir, Mohamed Benbouzid, Zhibin Zhou. *Power Supply Architectures for Drones – A Review*. Conference Paper. 2019. DOI: 10.1109/IECON.2019.8927702.
- [64] Mitchell D. Hageman, Thomas E. McLaughlin. *Considerations for Pairing the IC Engine and Electric Motor in a Hybrid Power System for Small UAVs*. AIA SciTech Forum, January 2018, Kissimmee. 2018. DOI: 10.2514/6.2018-2132.
- [65] Mithun Abdul Sathar, Nuwantha Fernando, Matthew Marino, Graham Wild. *Hybrid Propulsion Systems for Remotely Piloted Aircraft Systems*. 2018. DOI: 10.3390/aerospace5020034.
- [66] Sheldon S. Williamson, Srdjan M. Lukic, Ali Emadi. *Comprehensive Drive Train Efficiency Analysis of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Motor-Controller Efficiency Modeling*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 3, pp. 730-740. 2006. DOI: 10.1109/TPEL.2006.872388.
- [67] F. G. Harmon. *Neural network control of a parallel hybrid-electric propulsion system for a small unmanned aerial vehicle*. Neural Networks, 18(5–6): 772–780, 2005.
- [68] Wang Lu, Daibing Zhang, Jiyang Zhang, Tengxiang Li, Tianjiang Hu. *Design and Implementation of a Gasoline-Electric Hybrid Propulsion System for a Micro Triple Tilt-Uotor VTOL UAV*. 2017 IEEE 6th Data Driven Control and Learning Systems Conference, Chongqing. 2017. Doi: 10.1109/DDCLS.2017.8068112.
- [69] Teresa Donateo, Luigi Spedicato, Davide Pio Placentino. *Design and performance evaluation of a hybrid electric power system for multicopters*. Energy Procedia. 126. 1035-1042. 2017.
- [70] *Perimeter 8's Specification*. Skyfront's website. Available Online: <https://skyfront.com/perimeter-8/>
- [71] *Fuel Cell Technologies Program: Comparison of Fuel Cell Technologies*. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy. Available Online: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/EERE\\_Fuel\\_Cell\\_Comparison\\_Chart.pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/EERE_Fuel_Cell_Comparison_Chart.pdf)
- [72] M. Dudek, Piotr Wygonik, Pior Bogusz, Mariusz Korkosz. *Hybrid Fuel Cell - Battery System as a Main Power Unit for Small Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*. Article by International Journal of Electrochemical Science. 2013.
- [73] Chen H, Cong TN, Yang W, Tan C, Li Y, Ding Y. *Progress in electrical energy storage system: a critical review*. Progress in Natural Science, pp: 291–312. 2009.
- [74] Marc Lussier. *Extending Mission Duration of UAS Multicopters: Multi-Disciplinary Approach*. Thesis in University of Nebraska-Lincoln. 2019.
- [75] J. Larminie, A. Dicks. *Fuel cell systems analysed*. Fuel Cell Systems Explained. John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2013; pp. 369–389.
- [76] Z.F. Pan, L. An, C.Y. Wen. *Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles*. Applied Energy, Volume 240, pp 473-485. 2019.

- [77] Martin A. Green, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl-Ebinger, Anita W.Y. Ho-Baillie. *Solar Cell Efficiency Tables*. 2017. Doi: 10.1002/pip.2909.
- [78] F. Santoso, M. A. Garratt, S. G. Anavatti, I. Petersen. *Robust Hybrid Nonlinear Control Systems for the Dynamics of a Quadcopter Drone*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2018. DOI: 10.1109/TSMC.2018.2836922.
- [79] *Products: VECTOR*. UAV Navigation Cutting-edge Autopilots's Website. Available Online: <https://www.uavnavigation.com/products/autopilots/vector>
- [80] Aristidis Likas, Nikos Vlassis, Jakob J. Verbeek. *The Global k-means clustering algorithm*. Pattern Recognition Vol. 36, pp 451-461. 2003. DOI: 10.1016/S0031-3203(02)00060-2.
- [81] Fréchet distance. Article in Wikipedia. Available Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9chet\\_distance](https://en.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9chet_distance)
- [82] Jeonghoon Kwak, Yusick Sung. *Path Generation Method of UAV Autopilots Using Max-Min Algorithm*. J Inf Process Syst. Vol. 14 No. 6 pp. 1457-1463. 2018.
- [83] SC-228, *Minimum Performance Standards for Unmanned Aircraft Systems, Special Committees*. RTCA's website. Available Online: <https://www.rtca.org/content/sc-228>
- [84] *FlightHorizon PILOT, Products*. Vigilant Aerospace Systems's Website. Available Online: <https://vigilantaerospace.com/products-services-overview/flighthorizon-pilot/>
- [85] Andrew C. Cone, David Thipphavong, Seung Man lee, Confesor Santiago. *UAS Well Clear Recovery Against Non-Cooperative Intruders using Vertical Maneuvers*. 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 5-9 June 2017, Denver. 2017. DOI: 10.2514/6.2017-4382.
- [86] Y. Lin, J. Hyyppä, A. Jaakkola. *Mini-UAV-Borne LIDAR for Fine-Scale Mapping*. Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 8, no. 3, pp. 426-430. 2011. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2079913.
- [87] Seadat Dogru, Lino Marques. *Tracking Drones with Drones Using Millimeter Wave Radar*. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-36150-1\_32.
- [88] A. Zhahir, A. Razali, M. R. Mohd Ajir. *Current development of UAV sense and avoid system*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. DOI: 10.1088/1757-899X/152/1/012035.
- [89] Hu Sheng, Haiyang Chao, Cal Coopmans, Jinlu Han, Mac McKee, YangQuan Chen. *Low-Cost UAV-Based Thermal Infrared Remote Sensing: Platform, Calibration and Applications*. Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications. 2010. Doi: 10.1109/mesa.2010.5552031.
- [90] S. Park, Y. Kim, E. T. Matson, A. H. Smith. *Accessible synthetic aperture radar system for autonomous vehicle sensing*. IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Catania, 2016, pp. 1-6. 2016. DOI: 10.1109/SAS.2016.7479897.
- [91] Xiang Yu, Yumin Zhang. *Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: Review and prospects*. 2015. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.01.001.

[92] *U-Space Concept of Operations – Topic: 01: SESAR UTM Concept Definition*. SESAR, coordinator: Eurocontrol. 2016 SESAR 2020 RPAS Exploratory Research Call. Edition: 03.00.02. 2019.

[93] *Manual on system wide information management (SWIM) concept*. International Civil Aviation Organization. Doc 10039, AN/51. Available Online: <https://www.icao.int/airnavigation/IMP/Documents/SWIM%20Concept%20V2%20Draft%20with%20DISCLAIMER.pdf>

[94] J. Chris Moody Jr, Robert C. Strain. *Implementation Consideration for Automatic Dependent Surveillance-Broadcast on Unmanned Aircraft Systems*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2009. DOI: 10.2514/6.2009-1865.

[95] *Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (UTM) – A Common Framework with Core Principles for Global Harmonization*. ICAO. Edition 2. Available Online: <https://www.icao.int/safety/UA/Documents/UTM-Framework.en.alltext.pdf>

[96] Daniel D. Harabor, Peter Stuckey. *An Introduction to Contraction Hierarchies*. International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). 2018. Available Online: <https://movingai.com/IJCAI18-HS/ijcai-hs-harabor.pdf>

[97] Fadhil Mukhlif, Abdu Saif. *Comparative Study On Bellman-Ford And Dijkstra Algorithms*. International Conference on Communication, Electrical and Computer Networks (ICCECN 2020), Kuala Lumpur. 2020.

[98] *Dijkstra vs Bi-directional Dijkstra Progress - Rectangular and Hexagonal Grid*. Meyavuz channel. Virtual demonstration. 2017. Available Online: <https://www.youtube.com/watch?v=8Jjdp6f7oaE>

[99] James B. Orlin, Kamesh Madduri, K. Subramani, M. Williamson. *A faster algorithm for the single source shortest path problem with few distinct positive lengths*. Jurnal of Discrete Algorithms 8 pp. 189-198. 2010. DOI: 10.1016/j.jda.2009.03.001.

[100] Emmanuel Sunil, Jacco Hoekstra, Joost Ellerbroek, Frank Bussink, Dennis Nieuwenhuisen, Andrija Vidosavljevic, Stedan Kern. *Metropolis: Relating Airspace Structure and Capacity for Exxtreme Traffic Densities*. Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015). 2015.

[101] M. Perez-Batlle, E. Pastor, X. Prats, P. Royo, R. Cuadrado. *Maintaining separation between airliners and RPAS in non-segregated airspace*. 2013. DOI: 10.13140/2.1.2688.8320.

[102] Mia N. Stevens, Brandon T. Coloe, Ella M. Atkins. *Platform-Independent Geofencing for Low Altitude UAS Operations*. 2017. DOI: 10.2514/6.2015-3329.

[103] *UPS Tests Residential Delivery via Drone*. Workhorse Group Channel. Practical demonstration. Available Online: [https://www.youtube.com/watch?v=HEkHhZDuLhU&feature=emb\\_title](https://www.youtube.com/watch?v=HEkHhZDuLhU&feature=emb_title)

[104] *Multi-Level Fulfillment Center for Unmanned Aerial Vehicles*. Amazon Technologies Inc. Patent Application Publication. No.: US 2017/0175413 A1. 2017.

[105] *Method and system for retrieving a package delivered by an unmanned aerial vehicle*. Walmart Apollo. Patent Application Publication. No.: US 2019/0300202 A1.